



รายงานการวิจัย

การสังเคราะห์หมึกผสมผลึกนาโนซิลิคอนสำหรับการผลิตเซลล์
แสงอาทิตย์แบบใหม่และต้นทุนต่ำ
Synthesis of Silicon Nano-Composite Inks for Novel and
Low-Cost Solar Cell Fabrication

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การสังเคราะห์หมึกผสมผลึกนาโนซิลิคอนสำหรับการผลิตเซลล์
แสงอาทิตย์แบบใหม่และต้นทุนต่ำ
Synthesis of Silicon Nano-Composite Inks for Novel and
Low-Cost Solar Cell Fabrication

ผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผศ.ดร. ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2557-2558

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กุมภาพันธ์ 2561

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2557 และ 2558 ผู้วิจัยทุกท่านขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

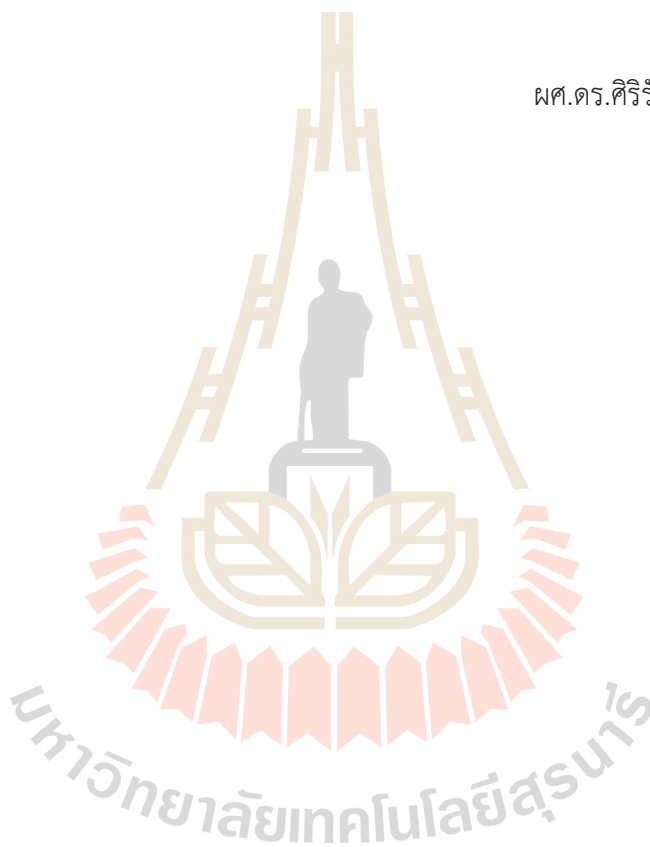
ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร.ศิริรัตน์ ทับสูงเนิน รัตน์จันทร์ และดร.อรรถพล มณีแดง สำหรับคำแนะนำที่เป็นประโยชน์กับการสังเคราะห์สาร

ผศ.ดร. ทิพย์วรรณ พึ่งสุวรรณรักษ์

ดร.อรรถพล มณีแดง

ผศ.ดร.ศิริรัตน์ ทับสูงเนิน รัตน์จันทร์

2561



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์หมึกซิลิคอนดอทในสารละลายออร์แกนิก และหมึกซิลิคอนดอทในสารละลายซิงค์อะซิเตท สำหรับผลิตฟิล์มบางซิลิคอนดอท ความแตกต่างของสารละลายตัวกลางของหมึกและความหนาแน่นของอนุภาคผลึกซิลิคอนมีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าและแสงของฟิล์มซิลิคอนดอท กรณีของหมึกซิลิคอนเข้มข้นสูงในตัวกลางสารละลายออร์แกนิกได้เคลือบบนแผ่นฐานด้วยวิธีการพิมพ์ลาย ฟิล์มซิลิคอนดอทที่บแสงที่ผลิตได้มีองค์ประกอบของเฟสอนุภาคผลึกซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งให้สมบัติที่บแสง ฟิล์มที่ได้สามารถควบคุมปริมาณสารเจือฟอสฟอรัสได้ จึงสามารถใช้เป็นแหล่งสารเจือเพื่อเกิดกระบวนการแพร่ที่ความร้อนได้ตั้งแต่อุณหภูมิสูงกว่า 500°C กรณีของหมึกซิลิคอนเข้มข้นต่ำในสารละลายซิงค์อะซิเตทสามารถเคลือบบนแผ่นฐานเป็นฟิล์มซิลิคอนดอทในตัวกลางเมตริกซ์ ZnO:Bi ซึ่งให้สมบัติที่โปร่งแสง คุณสมบัติการทะลุผ่านของแสงที่ให้ค่าสูงไม่ต่ำกว่า 70% ขึ้นอยู่กับปริมาณอนุภาคผลึกซิลิคอนที่มากในหมึกที่สังเคราะห์ขึ้น ฟิล์มให้คุณสมบัติตอบสนองต่อแสงโพตอนได้ดี และให้อัตราการขยายกระแสโฟโตประมาณ 10^4 เท่าเทียบกับกระแสมืด

เซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบที่ประกอบด้วยฟิล์มซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ ZnO:Bi ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้เพื่อประยุกต์เป็นชั้นรับแสงของรอยต่อ p/n จากผลพบพฤติกรรมของโฟโตโวลเทอิกของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ ซึ่งไม่มีชั้นพาสซีเวชันที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดในกลุ่มประมาณ 7.95% ในเซลล์ที่ใช้ฟิล์มซิลิคอนดอทความหนาแน่นต่ำ โดยให้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรประมาณ 34.6 mA/cm^2 แรงดันเปิดวงจรประมาณ 528 mV และฟิลแฟคเตอร์ประมาณ 0.435

จากการวิเคราะห์ความคุ้มค่าและต้นทุนการผลิต ได้คาดการณ์ต้นทุนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกนาโนซิลิคอนดอทที่ประกอบด้วยชั้นฟิล์มบางคอมโพสิต Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi จะสามารถให้ประสิทธิภาพสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 1.46% หรือให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานประมาณ 19.86% หรือคิดเป็น 4.879 watt/cell พบว่ามีต้นทุนการผลิตรวมอยู่ที่ 80.405 cent/cell หรือ 16.48 cent/watt ผลดังกล่าวสรุปได้ว่า เมื่อนำไปสู่การผลิตในอุตสาหกรรมจะมีความคุ้มค่า เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่ถูกลงเมื่อเทียบกับผลผลิตกำลังไฟฟ้า (watt) ที่ได้จากเซลล์ โดยให้ต้นทุนการผลิตลดลงประมาณ 1.18 cent/watt

Abstract

In this research, silicon (Si) ink in organic solution and silicon ink in zinc acetate solution were synthesized for production of various Si dots films. The various of matrix solution and Si powder concentrations has a huge amount of influence over the electrical and optical properties of Si dots film. In case of high Si dots concentration with organic solution, the Si dots films were formed by coating through a screen-printing technique. The opaque Si dots film is composed of nanocrystalline Si phase dispersed over silicon dioxide. The amounts of dopant as phosphorus in films are adjustable to exploit in thermal diffusion above 500°C. In case of low Si dots concentration with zinc acetate solution, the Si dots in ZnO:Bi matrix were performed by spin-coating technique. The high transparent Si dots films were obtained above 70% depending on an amount of Si powder in films. The Si dots in ZnO:Bi films showed good photo-responsibility as a photocatalyst film and high photo-current gain around 10^4 times comparing with dark current.

Solar cell prototype structure composed of Si dots film was investigated in this research for application in additional emitter layer on p/n junction. Photovoltaic behavior was occurred in Si dots solar cell without passivation layer. Power conversion efficiency is of 7.95% for such sample with low Si dot concentration. Electrical parameters of J_{sc} , V_{oc} and FF are of 34.6 mA/cm², 528 mV and 0.435, respectively.

Based on the cost and value analysis this novel cell will be able to provide approximately of 1.46% which is the higher power conversion efficiency (PCE) by 1.46% than a cell standard. The PCE predicted is about 19.86% or 4.879 watt/cell. The total production cost is 80.405 cent/cell or 16.48 cent/watt. When Si dot solar cell is produced in the industrial process, it will be worthwhile due to the lower production cost compared to the power yield (watt) obtained from the cell. It is noted that the mass production of Si dot solar cells can lead to reduce the production cost by approximately 1.18 cent/watt.

สารบัญ

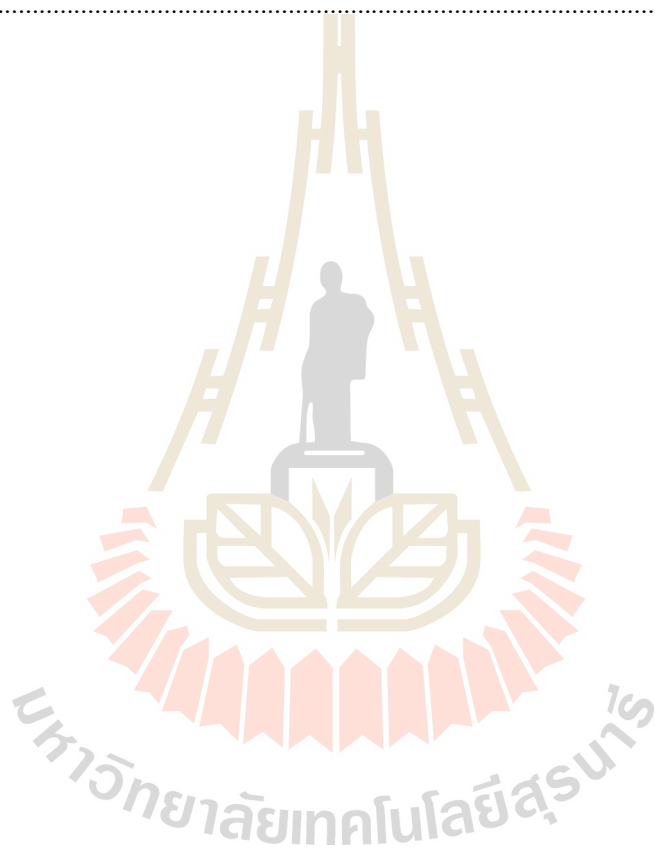
| | หน้า |
|--|------|
| กิตติกรรมประกาศ | ก |
| บทคัดย่อ | ข |
| Abstract | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตาราง | ฉ |
| สารบัญภาพ | ช |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 5 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 5 |
| 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย | 5 |
| 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย | 6 |
| | |
| บทที่ 2 ทฤษฎีการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ | |
| 2.1 หลักการขยายแถบพลังงานดูดกลืนของผลึกนาโนซิลิคอน..... | 8 |
| 2.2 กลไกการสูญเสียภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น | 14 |
| 2.3 หลักการของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนาโนซิลิคอนดอท..... | 18 |
| 2.4 หลักการของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Selective Emitter | 19 |
| | |
| บทที่ 3 การผลิตหมึกซิลิคอนดอท และวิเคราะห์ผลของคุณลักษณะทางจุลโครงสร้าง | |
| 3.1 บทนำ | 22 |
| 3.2 การผลิตผงซิลิคอนด้วยวิธี Grinding Balls..... | 22 |
| 3.3 คุณสมบัติทางจุลโครงสร้างของผงซิลิคอน | 24 |
| 3.3.1 การวัดขนาดของผงซิลิคอนด้วยเทคนิค Particle Size Analysis | 24 |
| 3.3.2 การวัดคุณภาพผลึกของผงซิลิคอนด้วยเทคนิค X-ray diffraction | 25 |
| 3.4 หมึกซิลิคอนดอทเข้มข้นสูง และการผลิตฟิล์มบางซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ ออกไซด์ | 27 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า | |
|---------|--|----|
| 3.4.1 | การสังเคราะห์หมึกซิลิคอนดอทเข้มข้นสูง..... | 27 |
| 3.4.2 | การผลิตฟิล์มซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ออกไซด์ | 29 |
| 3.4.3 | การวิเคราะห์จุลโครงสร้างของฟิล์มซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ออกไซด์ | 31 |
| 3.4.4 | การปรับเปลี่ยนปริมาณอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสในฟิล์มซิลิคอน ดอทในเมตริกซ์ออกไซด์ | 31 |
| 3.4.5 | การแพร่ของอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสในฟิล์มซิลิคอนดอทใน เมตริกซ์ออกไซด์ | 36 |
| 3.4.5 | สมบัติทางไฟฟ้าภายใต้แสงของฟิล์มซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ออกไซด์ | 38 |
| 3.5 | หมึกซิลิคอนดอทสำหรับการผลิตฟิล์มบางซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ ZnO:Bi | 40 |
| 3.5.1 | การวัดคุณภาพผลึกของฟิล์ม Si dots ด้วยเทคนิค X-ray diffraction | 44 |
| 3.5.2 | สมบัติทางไฟฟ้าภายใต้แสงของฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi | 45 |
| 3.5.3 | คุณสมบัติทางแสงของฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi | 46 |
| 3.6 | สรุป | 49 |
| บทที่ 4 | เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนต้นแบบผลึกนาโนซิลิคอนดอท | |
| 4.1 | บทนำ | 52 |
| 4.2 | การผลิตต้นแบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกนาโนซิลิคอนดอท | 52 |
| 4.3 | สรุป | 54 |
| บทที่ 5 | การวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วย และความคุ้มค่า | |
| 5.1 | บทนำ | 55 |
| 5.2 | การวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วย และความคุ้มค่า..... | 55 |
| 5.3 | สรุป | 59 |
| บทที่ 6 | สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ | |
| 6.1 | สรุปผลงานวิจัย | 60 |
| 6.1.1 | การผลิตผลึกซิลิคอนด้วยวิธีต้นทุนต่ำ | 60 |
| 6.1.2 | การผลิตหมึกซิลิคอนดอทเข้มข้นสูงในสารละลายออร์แกนิก | 60 |
| 6.1.3 | หมึกซิลิคอนดอทเข้มข้นต่ำในสารละลาย ZnAc | 61 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า | |
|-----------------|---|----|
| 6.1.4 | ต้นแบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกนาโนซิลิคอนดอท | 61 |
| 6.1.5 | ความคุ้มค่าและต้นทุนต่อหน่วย | |
| 6.2 | ข้อเสนอแนะ | 62 |
| บรรณานุกรม | | 63 |
| ประวัติผู้วิจัย | | 67 |



สารบัญตาราง

| | | หน้า |
|--------------|---|------|
| ตารางที่ 2.1 | ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Selective emitter ในวิธีการผลิตแบบต่าง ๆ..... | 21 |
| ตารางที่ 3.1 | ขนาดผลึกของ Si powder ที่ผลิตด้วยวิธี Zirconia Grinding Balls | 27 |
| ตารางที่ 3.2 | ปริมาณอะตอมของธาตุที่วิเคราะห์จาก EDX ในฟิล์ม Si dot เปรียบเทียบกับในชั้น n-Si ของเซลล์แสงอาทิตย์..... | 35 |
| ตารางที่ 3.3 | ขนาดของผลึก Si dots และผลึก ZnO:Bi ในฟิล์ม Si dots | 45 |
| ตารางที่ 5.1 | ส่วนประกอบของต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์..... | 56 |
| ตารางที่ 5.2 | คาดการณ์ต้นทุนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกนาโนซิลิคอนดอทที่ประกอบด้วยชั้นฟิล์มบางคอมโพสิต Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi | 57 |
| ตารางที่ 5.3 | การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกโพลีซิลิคอนโครงสร้างมาตรฐานอุตสาหกรรมในประเทศไทย กับการคาดการณ์ต้นทุนการผลิตเซลล์ในงานวิจัย | 58 |

สารบัญรูปภาพ

| รูปที่ | | หน้า |
|-------------|---|------|
| รูปที่ 2.1 | การส่งผ่านพลังงานแบบตรง และแบบไม่ตรงของวัสดุสารกึ่งตัวนำ..... | 8 |
| รูปที่ 2.2 | ลักษณะของฟิล์มบางโครงสร้างนาโนและการจำกัดพลังงานควอนตัมเปรียบเทียบกับก้อนผลึก..... | 10 |
| รูปที่ 2.3 | โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดควอนตัมดอท (ก) Schottky cell (ข) Depleted heterojunction cell (ค) Hybrid polymer cells และ (ง) Quantum dot sensitized cell..... | 11 |
| รูปที่ 2.4 | แถบพลังงานของของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดควอนตัมดอทแบบ heterojunction cell..... | 12 |
| รูปที่ 2.5 | ลักษณะการตอบสนองของ Quantum dots tandem cells ที่มีช่องว่างพลังงานบริเวณรอยต่อต่าง ๆ | 13 |
| รูปที่ 2.6 | การจัดเรียงแถบพลังงานของ Quantum dots tandem cells 2 เซลล์ | 13 |
| รูปที่ 2.7 | กลไกการผลิต Multiple carriers ใน QDs การถ่ายโอนพลังงานให้กับคู่อิเล็กตรอน - โฮล ของโครงสร้างควอนตัมดอทด้วยกระบวนการ impact ionization..... | 14 |
| รูปที่ 2.8 | สเปกตรัมความเข้มแสงที่ส่องสว่างจากดวงอาทิตย์ในความยาวคลื่นช่วงกว้างที่ผ่านชั้นบรรยากาศตามมาตรฐาน | 16 |
| รูปที่ 2.9 | กลไกการสูญเสียประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งรอยต่อ | 17 |
| รูปที่ 2.10 | การเปรียบเทียบสเปกตรัมแสงพระอาทิตย์ กับบริเวณช่วงความยาวคลื่นที่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนสามารถแปลงพลังงานได้ และบริเวณการสูญเสียต่าง ๆ | 17 |
| รูปที่ 2.11 | สเปกตรัม AM1.5G และการตอบสนองความยาวคลื่นในช่วงต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนาโนซิลิคอนแทนเดมเซลล์..... | 18 |
| รูปที่ 2.12 | บริเวณการตอบสนองแสงคลื่นสั้นและคลื่นยาวของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Selective emitter | 20 |
| รูปที่ 2.13 | การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (Internal Quantum Efficiency, IQE) บริเวณสเปกตรัมแสงย่านความยาวคลื่นสั้นของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Selective emitter..... | 20 |
| รูปที่ 3.1 | (ก) โกร่งบดแผ่นซิลิคอน (ข) อุปกรณ์บดผงด้วย Milling balls (ข) ผงซิลิคอนที่ได้จากการบด..... | 23 |

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|-------------|---|
| รูปที่ 3.2 | ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความถี่ในการพบนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาคที่วัดจากเครื่อง Particle Size Analysis..... 24 |
| รูปที่ 3.3 | รูปแบบสเปกตรัม XRD ที่วัดได้ของผงซิลิคอนที่ผลิตได้ที่ระยะเวลาการบดต่างกัน..... 25 |
| รูปที่ 3.4 | (ก) ขั้นตอนการผลิต TEOS sol-gel และ (ข) สารละลาย TEOS sol-gel ที่ได้ 28 |
| รูปที่ 3.5 | การหมัก Si dots เข้มข้นสูงในสารละลายอินทรีย์..... 29 |
| รูปที่ 3.6 | ภาพถ่ายจาก Optical microscope (x10) ของฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ออกไซด์ที่อุณหภูมิการอบ 100- 900°C..... 30 |
| รูปที่ 3.7 | ภาพถ่าย SEM JEOL รุ่น j6010 (ก) กำลังขยาย 1500 เท่า และ (ข) 500 เท่าของฟิล์มซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ออกไซด์..... 31 |
| รูปที่ 3.8 | ฟิล์มซิลิคอนดอทบนโครงสร้างเซลล์อาทิตย์ชนิดซิลิคอน..... 32 |
| รูปที่ 3.9 | (ก)-(จ) ภาพถ่าย FESEM และ EDX ปริมาณอะตอมที่พบในฟิล์มในเงื่อนไข TEOS sol-gel ที่สัดส่วน 0 0.33 0.67 และ 1.00 เปรียบเทียบกับในชั้น n-Si ของเซลล์แสงอาทิตย์..... 34 |
| รูปที่ 3.10 | ความสัมพันธ์ของปริมาณอะตอม %Weight ของฟอสฟอรัส ออกซิเจน และซิลิคอน ในฟิล์มซิลิคอนดอทในเงื่อนไขของปริมาณสัดส่วน TEOS sol-gel..... 35 |
| รูปที่ 3.11 | (ก)-(ง) ภาพถ่าย FESEM และ EDX ของปริมาณอะตอมที่พบในฟิล์มซิลิคอนดอทในเงื่อนไขอุณหภูมิการอบที่ 100°C ถึง 700°C..... 37 |
| รูปที่ 3.12 | ความสัมพันธ์ของปริมาณธาตุ (%wt.) ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิการอบฟิล์ม..... 38 |
| รูปที่ 3.13 | แผนภาพของระบบการวัด J-V ของฟิล์ม Si dots..... 38 |
| รูปที่ 3.14 | (ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของฟิล์มบาง Si dots เข้มข้นสูงในเมตริกซ์ออกไซด์..... 39 |
| รูปที่ 3.15 | แผนภาพขั้นตอนการผลิตหมึก Si dots ในสารละลาย ZnAc..... 41 |
| รูปที่ 3.16 | หมึก Si dots ในสารละลาย ZnAc..... 41 |
| รูปที่ 3.17 | ภาพถ่าย FSEM กำลังขยาย 105 เท่า (ด้านขวา) ของ (ก) ฟิล์ม ZnO และฟิล์ม Si dots ในเงื่อนไขปริมาณผงซิลิคอนในหมึก (ข) 0.03g (ค) 0.10g และ (ง) 0.15g 42 |

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|-------------|---|------|
| รูปที่ 3.18 | ผลการวิเคราะห์ธาตุ Si O และ Zn (n) ที่บริเวณอนุภาคผลึก Si และ (ข) บริเวณล้อมรอบ ตามลำดับ | 43 |
| รูปที่ 3.19 | สเปกตรัม XRD ของฟิล์ม Si dots..... | 44 |
| รูปที่ 3.20 | ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi..... | 45 |
| รูปที่ 3.21 | ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity) ของฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ (ZnO:Bi)..... | 46 |
| รูปที่ 3.22 | สเปกตรัมการสะท้อนแสงกลับที่ผิวของฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi ที่เงื่อนไขปริมาณผงซิลิคอน..... | 47 |
| รูปที่ 3.23 | สเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi ที่เงื่อนไขปริมาณผงซิลิคอน..... | 47 |
| รูปที่ 3.24 | สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi ในเงื่อนไขปริมาณผงซิลิคอน..... | 48 |
| รูปที่ 3.25 | (ก)-(ข) สเปกตรัมดัชนีหักเหแสง, n และ ค่าสูญหายทางแสง k ตามลำดับ | 50 |
| รูปที่ 3.26 | (ก)-(ข) สเปกตรัมไดอิเล็กทริกเทอมจริง ϵ_1 และเทอมจินตภาพ ϵ_2 ตามลำดับ | 51 |
| รูปที่ 4.1 | โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ Si dots ต้นแบบสำหรับแนวทางการศึกษาพัฒนาในเบื้องต้น..... | 52 |
| รูปที่ 4.2 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ Si Dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi ในเงื่อนไขความหนาแน่น Si dots..... | 53 |
| รูปที่ 5.1 | สัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของประเภทต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนในเชิงพาณิชย์..... | 57 |
| รูปที่ 5.2 | ประเภทต้นทุนราคา (cent/watt) การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนในเชิงพาณิชย์..... | 57 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

จากการที่ประเทศไทยมีแนวโน้มการใช้พลังงานสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และความจำเป็นที่ต้องเตรียมหาแหล่งพลังงานสำรองในอนาคต เพื่อช่วยกระจายความเสี่ยงในการจัดหาเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้า การพัฒนาพลังงานทดแทนอย่างจริงจังจะเป็นหนทางที่ช่วยลดการพึ่งพาและการนำเข้าพลังงานได้ พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนอย่างหนึ่งซึ่งสามารถนำมาทดแทนก๊าซธรรมชาติสำหรับการผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีต้นทุนการจัดหาพลังงาน เป็นแหล่งพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ปราศจากกลไกทางกล และไม่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกใด ๆ ระหว่างการแปลงพลังงาน การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีปริมาณเพิ่มขึ้นทั่วโลกไม่ต่ำกว่า ขนาดของแผงเซลล์ในปัจจุบันได้มีการสนับสนุนในเชิงนโยบายการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปธรรมมากขึ้น จากการเริ่มนโยบายการสนับสนุนการรับซื้อพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับ VSPP (Very small power producer) ในปี พ.ศ. 2551 พร้อมกับมีเพิ่มราคาซื้อไฟฟ้า (Adder) ทำให้เกิดการขยายตัวในการติดตั้งเพื่อขายไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งขนาดกำลังผลิตเข้าใกล้ระดับกำลังไฟฟ้าเป้าหมายตามนโยบายที่กำหนด คาดว่า

อย่างไรก็ตามการสนับสนุนเทคโนโลยีการผลิตและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นการสนับสนุนต้นน้ำนั้นยังมีสัดส่วนที่น้อยกว่า ดังนั้นการสนับสนุนด้านเทคโนโลยีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อก่อให้เกิดองค์ความรู้และมุ่งไปสู่การผลิตและปฏิบัติได้นั้น จะสามารถทำให้ประเทศไทยมีศักยภาพด้านพลังงานทดแทนทั้งการใช้งานซึ่งเป็นปลายน้ำจนถึงด้านองค์ความรู้ทางเทคโนโลยีและการผลิตอย่างยั่งยืนซึ่งเป็นต้นน้ำ สิ่งเหล่านี้จะเป็นส่วนสร้างความมั่นคงด้านพลังงานของชาติได้ในอนาคต

ดังนั้นกลุ่มผู้เสนอโครงการวิจัยมีแนวคิดต้องการนำแผ่นซิลิคอนที่เสื่อมสภาพ แปลงสภาพและพัฒนานวัตกรรมนาโนเทคโนโลยีให้เป็นผงซิลิคอนในระดับไมโครเมตร เพื่อลดปริมาณของผลึกซิลิคอนแผ่นฐาน ผสานกับการนำนวัตกรรมทางวิศวกรรมช่องว่างพลังงาน (Band gap engineering) คือการขยายค่าช่องว่างพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงของผลึกซิลิคอนด้วยหลักการของปรากฏการณ์การจำกัดทางควอนตัม (Quantum confinement effect) หรือปรากฏการณ์ ควอนไทเซชัน (Quantization effect) โดยกลุ่มผู้เสนอโครงการวิจัยมุ่งหมายเพื่อต่อยอดผลสำเร็จของการสังเคราะห์สารละลายคอมโพสิตของผลึกนาโนซิลิคอนแขวนลอยในโซลเจลได้ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส.) ซึ่งอาจเรียกอย่างง่ายว่า “หมึกนาโนซิลิคอน” และพัฒนาเป็นฟิล์มบางมีโครงสร้างของผลึกนาโนซิลิคอนฝังในซิงค์ออกไซด์ได้ปसरเจือบิสมัท ด้วยเทคนิค Sol-gel spin coating

เพื่อให้ช่องว่างพลังงานเพิ่มขึ้นจาก 1.1 eV ถึง 1.4 eV และยังให้คุณสมบัติการขยายกระแสไฟฟ้าด้วยแสง (Photocurrent) กว่า 10^3 เท่า ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการผลิต จากผลวิจัยดังกล่าวได้แสดงค่านำไฟฟ้าสูงกว่าฟิล์มบางชนิดเดียวกันที่ผลิตด้วยเทคนิค RF sputtering จากกลุ่มวิจัยที่ UNSW ถึง 102 เท่า อย่างไรก็ตามสารที่สังเคราะห์ได้เองนั้นมีลักษณะเป็นสารแขวนลอย ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการคงสภาพและคุณภาพของสารละลายคอมโพสิตผลึกนาโนซิลิคอน จากข้อด้อยต่าง ๆ ข้างต้นทำให้ผู้เสนอโครงการต้องการรวมกลุ่มการศึกษาแบบสหวิทยาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ เคมี และเซรามิก เพื่อเป็นกลุ่มที่วิจัยศึกษาสังเคราะห์สารละลายผลึกนาโนซิลิคอนให้อยู่ในรูปของคอลลอยด์ หรือเรียกอย่างง่ายว่า หมึกซิงค์ออกไซด์ผสมผลึกซิลิคอน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับอุปกรณ์โฟโตนิกส์ได้อย่างเป็นรูปธรรม ขณะเดียวกันการศึกษานี้ยังมุ่งเน้นการเชื่อมโยงไปสู่เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์แบบพิมพ์สำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ ต้นทุนต่ำ ในแบบพิมพ์ได้ (Printed Electronics) หมึกผสมผลึกนาโนซิลิคอนจะเป็นวัสดุใหม่ที่มีความสำคัญและจะเข้ามามีบทบาทในวงการอิเล็กทรอนิกส์ของประเทศไทย โดยมีการเชื่อมโยงความร่วมมือระหว่างหน่วยวิจัย มทส.กับหน่วยงาน Thailand Organic & Printed Electronics Innovation Center (TOPIC) ซึ่งเป็นหน่วยงานภายใต้ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

การสังเคราะห์หมึกนาโนซิลิคอนซึ่งจะเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญเพื่อเป็นฟิล์มบางที่ผลิตง่าย พื้นที่ขนาดใหญ่ด้วยวิธีเคลือบผิวด้วยแรงเหวี่ยง (Spin coating) การจุ่ม (Dip coating) การเคลือบแบบปาด (Doctor blading or knife coating) หรือการพิมพ์หมึกแบบฉีด (Ink-jet printing) ซึ่งมีต้นทุนต่ำกว่าเทคนิคอื่น ๆ เนื่องจากไม่พึ่งพาเทคโนโลยีระบบสุญญากาศ และมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปพัฒนาในเชิงพาณิชย์ขั้นสูงที่สอดคล้องกับอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศ จากศักยภาพของประเทศไทยที่มีหน่วยงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ ในมหาวิทยาลัยต่าง ๆ นั้นเราสามารถจัดกลุ่มเทคโนโลยีการผลิตวัสดุนาโนได้ในประเทศดังนี้

Molecular Beam Epitaxy (MBE) สังเคราะห์ InAs dots ที่อยู่ระหว่างชั้น GaAlAs และ GaAs สังเคราะห์ฟิล์มใช้ระบบสุญญากาศพิเศษ

Pyrolysis สังเคราะห์อนุภาค nanocarbon ที่มีโลหะเป็นองค์ประกอบ สังเคราะห์ Carbon nanotube และ Carbon nano-capsule เป็นวิธีที่ได้อนุภาคนาโนเล็กได้ถึง 2-5 nm

RF magnetron sputter สังเคราะห์ฟิล์ม a-Si และผ่านการอบอุณหภูมิสูง ตกผลึกในระดับนาโนเมตร เป็นวิธีที่ได้อนุภาคนาโนเล็กได้ถึง 2-5 nm แต่ต้องผ่านระบบแอลนีล 1000°C ขึ้นไปเป็นเวลานานหลายชั่วโมง

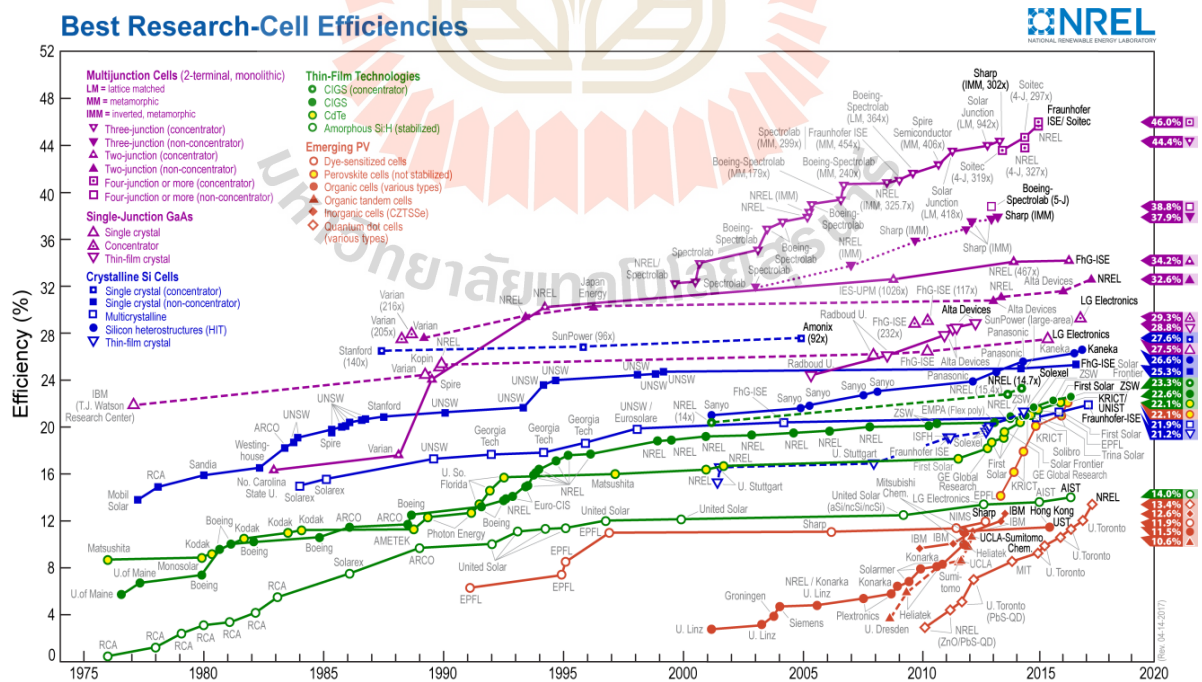
Plasma enhancement chemical vapor deposition (PECVD) sputter สังเคราะห์ a-Si และผ่านการอบอุณหภูมิสูงกว่า 1000°C ตกผลึกในระดับนาโนเมตร แต่ระบบนี้เกิดการเจือปนสูง

Spin coating technique สังเคราะห์ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่ผสมผงอนุภาคในระดับนาโนเมตร โดยไม่พึ่งพากระบวนการสุญญากาศระดับสูง อบอุ่นหภูมิต่ำ และเป็นเทคนิคต้นทุนต่ำกว่าเทคนิคอื่น ๆ แต่ต้องมีผงอนุภาคนาโนก่อน

Grinding technique สังเคราะห์ผงผลึกซิลิคอนที่มีอะตอมสารเจือตามต้องการได้ง่าย แต่ให้อนุภาคนาโนในระดับไมครอน ต้องผ่านกระบวนการออกซิเดชันเพื่อลดขนาดลง

หมึกนาโนซิลิคอนจัดเป็นสารตั้งต้นที่มีความสำคัญที่สุดในระดับต้นน้ำ สำหรับผลิตฟิล์มบาง ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีกรวิจัยเพื่อสังเคราะห์หมึกนาโนซิลิคอนได้ในประเทศ ดังนั้นโครงการวิจัยนี้ได้รับริเริ่มขึ้นมาด้วยมีเหตุจูงใจที่ต้องการพัฒนาฟิล์มบางผลึกนาโนซิลิคอนจากการสังเคราะห์หมึกนาโนซิลิคอน เพื่อให้เกิดสมบัติการคงตัวที่ดี ด้วยผลของการใช้สารลดแรงตึงผิว (surfactant) ที่เหมาะสม หลังจากผ่านกระบวนการอบ (Sintering) ให้เกิดเป็นฟิล์มบางที่มีสมบัติทางแสง และทางไฟฟ้า ที่ต้องเหมาะสมสำหรับผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกนาโนซิลิคอน และอาจใช้ผลิตอุปกรณ์โฟโตนิกอื่น ๆ ได้ต่อไป

เซลล์แสงอาทิตย์ได้มีการปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 1976 ทำให้เกิดเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ รูปที่ 1.1 แสดงวิวัฒนาการประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ เช่น ซิลิคอนผลึกเดี่ยวหนึ่งรอยต่อ แกลเลียมอาเซไนด์หนึ่งรอยต่อ เซลล์หลายรอยต่อ เทคโนโลยีฟิล์มบาง และเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน นอกจากนี้ยังพบอีกว่า แนวโน้มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนมีแนวโน้มที่เริ่มอิ่มตัว เมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่และแบบเซลล์หลายรอยต่อซึ่งจะให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 1.1 วิวัฒนาการของค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ (ที่มา <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนมีข้อจำกัดในเรื่องของประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากข้อจำกัดของซิลิคอนมีแถบพลังงานช่องว่างเท่ากับ 1.1eV (Energy gap: E_g) โดยที่ E_g คือพลังงานต่ำที่สุดที่กระตุ้นทำให้พันธะแตกออกแล้วเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระ (กระแสไฟฟ้า) ในสารกึ่งตัวนำ ความสัมพันธ์ของพลังงานและความยาวคลื่นแสดงในสมการที่ (1)

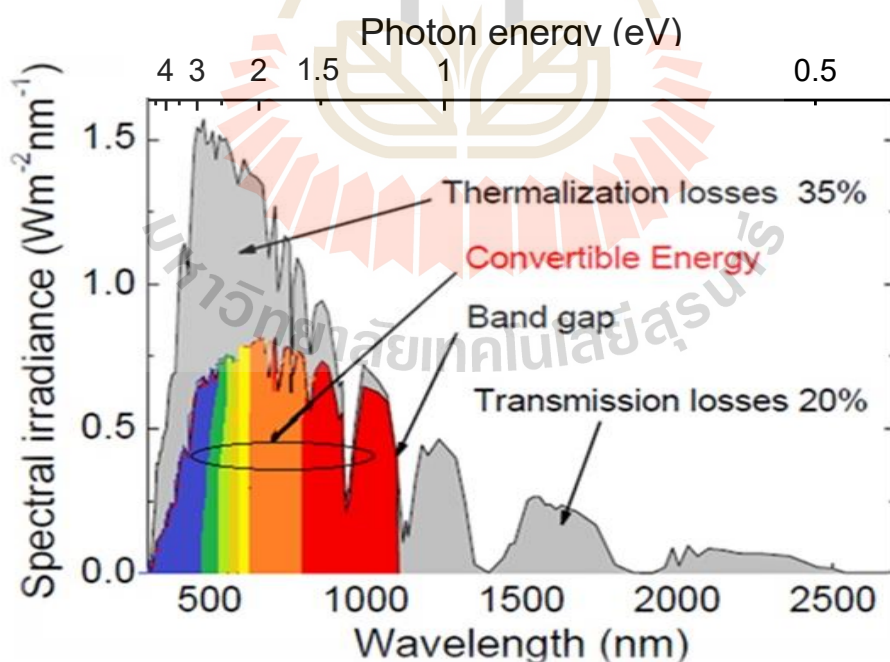
$$E_g (eV) = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

โดยที่ h คือค่าคงที่ของพลังค์มีค่าเท่ากับ 4.14×10^{-15} [eV·s]

c คือความเร็วของแสงมีค่าเท่ากับ 3.00×10^8 [m/s]

λ คือความยาวคลื่นของแสง [nm]

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนมีช่วงการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่แสงที่มองเห็นได้ (Visible light wavelength) ถึงคลื่นความร้อนที่มีความยาวคลื่น 1100nm แต่อย่างไรก็ตามผลึกซิลิคอนดูดกลืนแสงอย่างมีประสิทธิภาพที่ระดับค่า E_g หรือความยาวคลื่นที่ 1100 nm และเกิดการสูญเสียเชิงความร้อน (Thermalization loss) เกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นที่สั้นกว่า แต่ช่วงความยาวคลื่นยาวกว่า 1100 nm จะเกิดการสูญเสียจากการทะลุผ่านแสง แสดงในรูปที่ 1.2 ทำให้ค่าประสิทธิภาพมีขีดจำกัดทางทฤษฎีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนเท่ากับ 34.37% ซึ่งในปัจจุบันสามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีประสิทธิภาพได้ถึง 26.7%



รูปที่ 1.2 การสูญเสียเชิงความร้อน และการสูญเสียจากการทะลุผ่านของแสง

โครงสร้างผลึกนาโนซิลิคอน เป็นแนวทางอย่างหนึ่งที่สามารถปรับเปลี่ยนการตอบสนองแสงให้เกิดค่าขอบการดูดกลืนแสงไปทางความยาวคลื่นสั้นลง นั่นคือมีค่า E_g ที่กว้างขึ้น จากหลักการทางทฤษฎี ขนาดของผลึกซิลิคอนต้องมีขนาดเล็กกว่า Bohr radius (2nm -10 nm) แล้วล้อมรอบด้วยเมตริกซ์ของไดอิเล็กตริกซ์ที่มีค่า E_g สูงกว่าซิลิคอน จะทำให้เกิดการจำกัดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเรียกผลนี้ว่า การจำกัดเชิงควอนตัม (Quantum confinement effect) ทำให้เกิดการควอนไตซ์ของระดับพลังงาน และสามารถขยายระดับพลังงาน E_g ได้ จะสามารถลดผลของการสูญเสียเชิงความร้อน ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงขึ้น จากหลักการดังกล่าวเกิดแนวความคิดของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบด้วยชั้น p/n แบบหลายรอยต่อ (Multigap-cell) (Green M. A. ปี ค.ศ. 1982)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 สังเคราะห์หมึกผสมผลึกนาโนซิลิคอนเพื่อผลิตเป็นฟิล์มบางประสิทธิภาพสูง สำหรับประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์

1.2.2 พัฒนาระบวนการผลิตหมึกผสมผลึกนาโนซิลิคอนให้มีคุณภาพเพื่อเชื่อมโยงกับเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์แบบพิมพ์ลาย

1.2.3 เพื่อผลิตบุคลากรระดับบัณฑิตศึกษาได้อย่างน้อย 2 คนที่มีความรู้ ความสามารถในการพัฒนาเทคโนโลยีผลึกนาโนซิลิคอน สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์หรืออุปกรณ์โฟโตนิกส์อื่น ๆ และสามารถเผยแพร่ผลงานวิจัยได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 สังเคราะห์หมึกผสมผลึกนาโนซิลิคอนให้มีสมบัติการคงตัวที่ดี สามารถผลิตเป็นฟิล์มบางที่มีคุณภาพทางโครงสร้างผิวที่เหมาะสม สำหรับประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์

1.3.2 ควบคุมค่าช่องว่างพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ทางแสง และค่าทางไฟฟ้าของฟิล์มผลึกนาโนซิลิคอนได้ด้วยเงื่อนไขการผลิต

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ค้นคว้าความรู้ที่เกี่ยวข้องและเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินโครงการ และจัดหาอุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ

1.4.2 ผลิตผงผลึกซิลิคอนด้วยการใช้วิธีบดด้วย Zirconia Grinding Balls

4.1.3 ศึกษาและใช้สารละลายลายตัวกลางและสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสม เพื่อให้ผงผลึกซิลิคอนกระจายตัวที่ดี และให้ได้หมึกซิลิคอนที่มีเสถียรภาพการใช้งานที่ดี ควบคุมปัจจัยที่เหมาะสมได้แก่ ความเข้มข้นของสาร ความหนืดของสารละลาย การแพร่กระจายของสาร

4.1.4 ทดลองเคลือบบนแผ่นควอทซ์ และแผ่นซิลิคอนด้วยวิธีพิมพ์ลาย (Screen Printing) และวิธีหมุนเหวี่ยง (Spin coating) ศึกษาหาวิธีและเงื่อนไขการอบที่อุณหภูมิเหมาะสม เพื่อให้เกิดจุลโครงสร้างของฟิล์มที่ดี ตรวจสอบผิวในเบื้องต้นด้วยกล้อง Optical microscope

4.1.5 เมื่อได้คุณภาพผิวที่ดีภายใต้เงื่อนไขการอบที่เหมาะสมแล้ว นำไปวัดด้วยเครื่องมือวัดทางแสง

4.1.6 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการ annealing ภายในบรรยากาศ ต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดผลึกนาโน ค่าความเค้นของ Si dots ด้วยวิธีการตรวจสอบจากเครื่อง X-ray diffraction spectroscopy เครื่อง Micro Raman spectroscopy และเครื่อง Scanning Electron Microscope

4.1.7 ตรวจสอบลักษณะเฉพาะและความสัมพันธ์ของสมบัติของฟิล์มบางนาโนซิลิคอน เช่นความหนาของชั้นฟิล์มบาง ขนาดของผลึกนาโน ความหนาแน่น องค์ประกอบทางเคมี และจุลโครงสร้างที่ผิว

4.1.8 วัดสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางนาโนซิลิคอนที่ผลิตได้

4.1.9 วัดสมบัติทางแสงด้วยเทคนิคสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงคลื่นที่ UV ถึง ย่านอินฟราเรด เพื่อหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง การทะลุผ่านของแสง คำนวณหาค่าช่องว่างพลังงาน และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

4.1.10 หาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการผลิตกับค่าความนำทางไฟฟ้า และค่าช่องว่างพลังงาน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในโครงสร้างรอยต่อ p-n สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกนาโนซิลิคอน

4.1.11 เขียนบทความตีพิมพ์ และเผยแพร่เทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบางจากผลึกนาโน Si ที่ฝังใน SiO₂ ไปสู่องค์กร หรือภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องเพื่อส่งเสริมการผลิตในเชิงพาณิชย์

13.11 สรุปจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.5.1 เป็นองค์ความรู้ส่วนหนึ่งที่สำคัญของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนด้วยเทคนิค spin coating ซึ่งเป็นแนวทางที่ไม่พึ่งพาระบบสุญญากาศพิเศษ เพื่อลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

1.5.2 เผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ และตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการ ดังนี้

T. Fangsuwannarak, K. Kunchana, “Optical Properties of Nano-crystalline Silicon Films Prepared by Using Sol-Gel Spin Coating Process” The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics, No. 43: pp.106-110 (2013)

S. Chanrawangyot, S.T. Rattanachan, A. Watcharenwong, T. Fangsuwannarak, Antibacterial activity of ZnO nanoparticles coated on ceramic tiles prepared by sol-gel method, Journal of Metals, Materials and Minerals, Volume 27, Issue 2, p. 1-5 (2017)

ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ พีรวุฒิ รัตน์วิชัย รุ่งเรือง พัฒนากุล และ ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณ์รักษ์ “การสังเคราะห์ฟิล์มบางซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ของซิงค์ออกไซด์ได้ปบิสมัทจากหมึกคอมโพสิทซิลิคอน และคุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดวัสดุชั้นสูง” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 13-15 มิถุนายน 2561 จ.ระยอง หน้า 899-905

1.5.3 ผลิตบुकลากรในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สำเร็จในปีการศึกษา 2556 และ 2560 ได้ 2 คนที่มีความรู้ ความสามารถเฉพาะในการพัฒนาเทคโนโลยีนาโนซิลิคอนควอนตัมดอทสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ได้

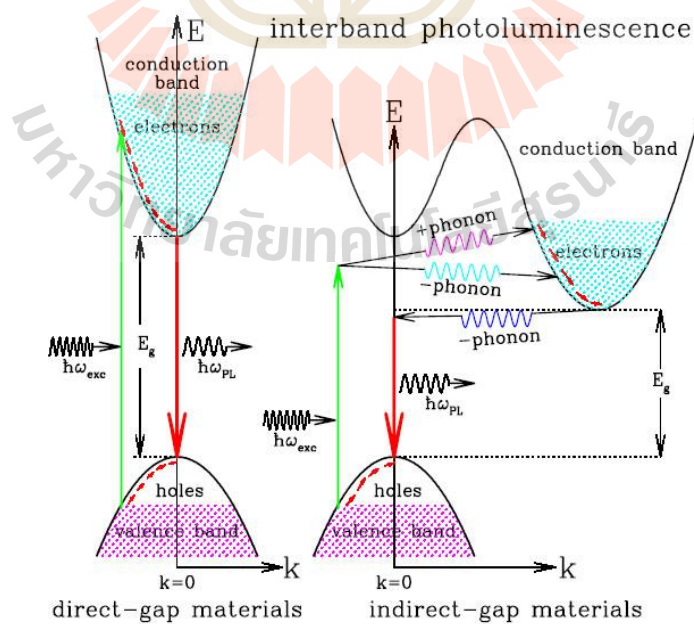


บทที่ 2

ทฤษฎีการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

2.1 หลักการขยายแถบพลังงานดูดกลืนของผลึกนาโนซิลิคอน

ผลึกซิลิคอนมีพฤติกรรมแถบพลังงานแบบไม่ตรง (Indirect bandgap) แสดงกลไกการถ่ายโอนพลังงานได้ดังรูปที่ 2.1 ไม่นิยมนำมาผลิตเป็นอุปกรณ์โฟโตนิกส์ เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์ที่ไม่เหมาะสมของการเปล่งแสงที่อุณหภูมิห้อง ในย่านที่ตามองเห็นได้ (Visible light) ลักษณะการดูดกลืนแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากยอดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันในกรณีฉนวนและสารกึ่งตัวนำเรียกว่า การดูดกลืนแสงพื้นฐาน (Fundamental absorption) และเรียกตำแหน่งหรือความยาวคลื่นของสเปกตรัมมีการดูดกลืนแสงนี้ว่า ขอบของการดูดกลืนแสงพื้นฐาน (Absorption edge) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับระดับพลังงานช่องว่าง (Energy band gap, E_g) ซึ่งบางครั้งจำเป็นต้องแสดงลักษณะแถบพลังงานเป็นฟังก์ชันเลขคลื่น (Wave number : k) ของอิเล็กตรอน และมีความหมายแสดงถึงโมเมนตัมของอิเล็กตรอน ซึ่งมีค่าเท่ากับ $p = \hbar k$ ในกรณีที่ยอดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันที่ตำแหน่งของ $k = 0$ พอดี เราเรียกว่าสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะส่งผ่านพลังงานแบบตรง หรืออาจเรียกว่าแถบพลังงานแบบตรง (Direct bandgap) ส่วนในกรณีที่ยอดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ในตำแหน่งที่ไม่ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชัน เราเรียกสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะการถ่ายโอนพลังงานแบบไม่ตรงนี้อาจเรียกว่าแถบพลังงานแบบไม่ตรง (Indirect bandgap)



รูปที่ 2.1 การส่งผ่านพลังงานแบบตรง และแบบไม่ตรงของวัสดุสารกึ่งตัวนำ (ned.ipac.caltech.edu)

การดูดกลืนแสงในแถบพลังงานแบบไม่ตรงมีลักษณะของจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันไม่ได้อยู่ในแนวเดียวกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ จึงไม่มีสถานะพลังงานใด ๆ ที่จะรองรับอิเล็กตรอนข้างบนในแนวตั้ง ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงกระโดดขึ้นไปสู่แถบคอนดักชันได้ก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปแล้วเปลี่ยนค่าโมเมนตัมโดยการมีอันตรกิริยากับโครงผลึก (Lattice) ซึ่งได้แก่การรับหรือถ่ายเทโมเมนตัมให้กับโครงผลึกที่กำลังสั่นอยู่ในปรากฏการณ์นี้ค่าโมเมนตัมของระบบจะยังรักษาให้คงที่ไว้ได้ จึงทำให้การดูดกลืนแสงในแถบพลังงานแบบไม่ตรงเกิดขึ้นได้ แต่เมื่ออยู่ในสถานการณ์ปล่อยพลังงานแบบรวมตัวใหม่ (Recombination emission) จะไม่มีประสิทธิผลที่ดี ดังนั้นวัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอนเราจะไม่พบการใช้งานเป็นอุปกรณ์เปล่งแสงได้เลย

วัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ได้แสดงสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์และทางแสงเปลี่ยนไปจากสมบัติจำเพาะเดิมของก้อนผลึกที่พาหะสามารถเดินทางอิสระได้ทุกทิศทาง ไปสู่การจำกัดการเคลื่อนที่ของประจุพาหะ เกิดเป็นปรากฏการณ์การจำกัดพลังงานทางควอนตัม (Quantum confinement effect) ผลดังกล่าวทำให้เกิดแถบพลังงานย่อย ๆ (Sub-bands) ขึ้นในบ่อพลังงาน ซึ่งเรียกว่าระดับพลังงานควอนไทซ์ (Quantized energy levels) ทำให้ขอบพลังงานคอนดักชัน และวาเลนซ์เลื่อนไป และได้ค่า E_g กว้างมากขึ้นเมื่อเทียบกับก้อนผลึก การเกิดระดับพลังงานควอนไทซ์ของวัสดุ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามลักษณะทิศทางการจำกัดพลังงาน ได้ดังนี้

1. One-dimension confinement เรียกว่าโครงสร้างแบบ quantum well แสดงถึงประจุพาหะสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกในสองแกน หรือ 2 มิติ (2D carrier transportation)
2. Two-dimension confinement เรียกว่าโครงสร้างแบบ quantum wire แสดงถึงประจุพาหะสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกในเพียงหนึ่งแกน หรือ 1 มิติ (1D carrier transportation)
3. Three-dimension confinement เรียกว่าโครงสร้างแบบ quantum dot แสดงถึงประจุพาหะถูกฝังในวัสดุตัวกลางอื่น จำกัดเคลื่อนที่ทั้งสามแกน หรือเรียกอีกอย่างว่าการเคลื่อนที่ 0 มิติ (0D carrier transportation)

การเคลื่อนที่พาหะถูกจำกัดทั้ง 3 มิติ แสดงเส้นกราฟความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (Density of state) เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับเส้นกราฟต่อเนื่องของก้อนผลึกด้านบนสีแดง อีกทั้งตำแหน่งขอบพลังงานคอนดักชัน (E_c) เลื่อนออกไป แสดงดังรูปที่ 2.2

$$E = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^*} \frac{1}{L_x^2} n_x^2 + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^*} \frac{1}{L^2} (n_y^2 + n_z^2) = E_x + E_{yz} \quad (2.1)$$

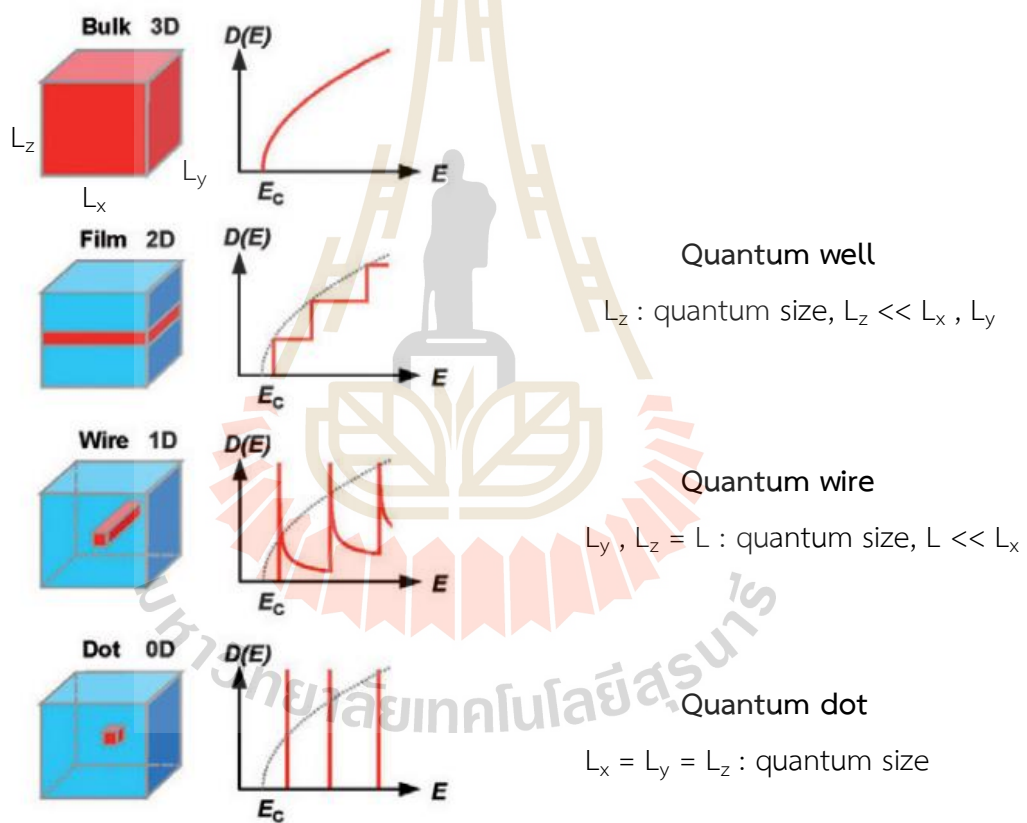
ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในระบบ Quantum wire มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง เมื่อพาหะถูกจำกัดในแกน y และ z ซึ่งเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแกน x จะได้ขนาด $L_y = L_z = L$ ในกรณีเช่นนี้ระดับ

พลังงานของอิเล็กตรอนในระบบ Quantum wire แสดงได้ดังนี้ และฟังก์ชันความหนาแน่นของสถานะพลังงานใน Quantum wire คือ

$$D(E) = \frac{\sqrt{2m^*}}{L^2 \hbar \pi} \cdot E_x^{-1/2} = \frac{\sqrt{2m^*}}{L^2 \hbar \pi} (E - E_{yz})^{-1/2} \quad (2.2)$$

ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในระบบ Quantum dots มีลักษณะเป็นเส้น เมื่อพาหะถูกจำกัดในแกน x y และ z จะได้ขนาด $L_x = L_y = L_z = L$ ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนใน Quantum dot มีค่าไม่ต่อเนื่อง ดังนี้

$$E = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^* L^2} (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2) \quad (2.3)$$



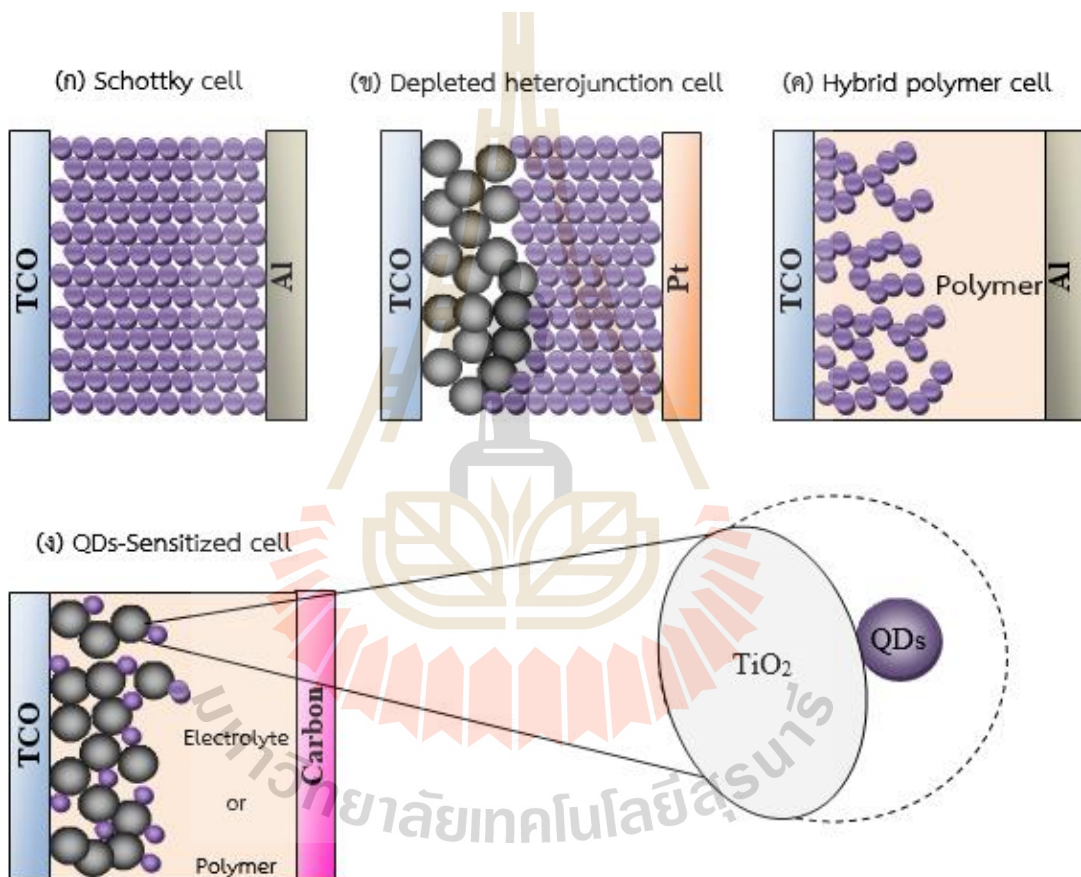
รูปที่ 2.2 ลักษณะของฟิล์มบางโครงสร้างนาโนและการจำกัดพลังงานควอนตัมเปรียบเทียบกับก้อนผลึก

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนาโนควอนตัมดอทที่มีโครงสร้างแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. เซลล์แสงอาทิตย์นาโนควอนตัมดอทชนิดชอตต์กี (Schottky solar cell) คือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน

2. เซลล์แสงอาทิตย์นาโนควอนตัมดอทชนิดเฮเทอโร (Depleted heterojunction solar cell) คือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน
3. เซลล์แสงอาทิตย์นาโนควอนตัมดอทชนิดไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ (Hybrid organic-inorganic solar cell) คือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากสารพอลิเมอร์และสารกึ่งตัวนำ
4. เซลล์แสงอาทิตย์นาโนควอนตัมดอทชนิดเซนต์ไดตซ์ (Quantum dot sensitized solar cell, QDSSC) คือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีวัสดุสารกึ่งตัวควอนตัมดอทขนาดเล็กแขวนลอยในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ หรือสารละลายพอลิเมอร์

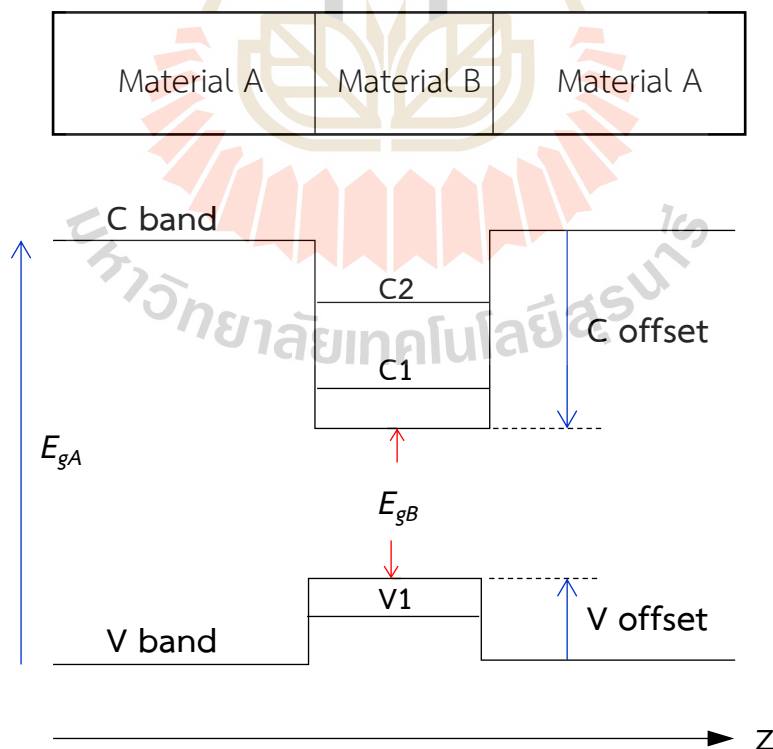
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 2.3 โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดควอนตัมดอท (ก) Schottky cell (ข) Depleted heterojunction cell (ค) Hybrid polymer cells และ (ง) Quantum dot sensitized cell

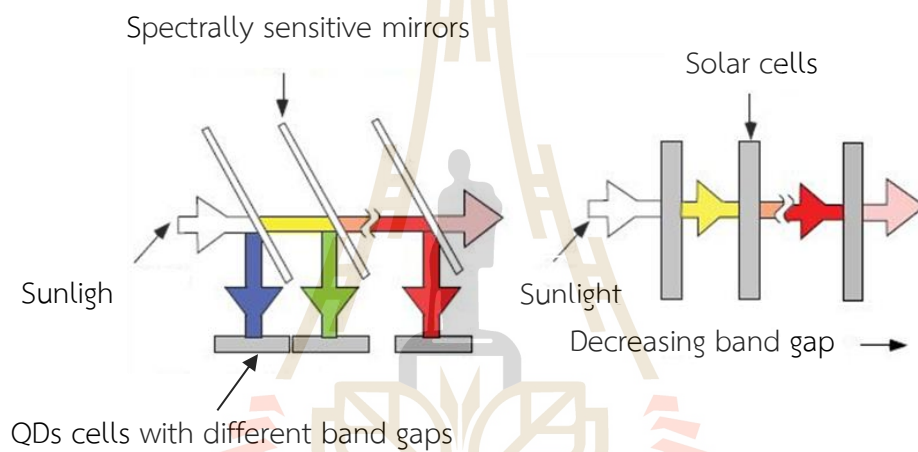
ในรูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดควอนตัมดอท ภายในโครงสร้างของแถบพลังงานสามารถเกิดปรากฏการณ์ของแถบพลังงานย่อย (Mini-bands) ในแถบวาเลนซ์ (V1) และคอนดักชัน หรือเกิดการควอนไทซ์ของแถบพลังงาน (Quantized energy band) ทำให้วัสดุควอนตัมดอทสามารถดูดกลืนแสงที่ย่านความยาวคลื่นแสงตามความกว้างของ Mini band ทำให้สามารถผลิตพาหะ

อิเล็กตรอน-โฮลที่ถูกกระตุ้นในแถบย่อยต่าง ๆ นั้น เรียกว่า Multiexciton generation (MEG) ซึ่งมีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ แม้กระนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดชอตต์ก็จะมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจากการคำนวณได้สูงถึง 32% เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านช่องว่างพลังงาน (Shovkley และ Queisser, 1961) ในส่วนโครงสร้าง QDSSC จะเกิดปัญหาของการเสื่อมลงของสารอิเล็กโทรไลต์ ที่ผ่านมามีงานวิจัยต่าง ๆ ได้ศึกษาโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็นจากสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันซึ่งนิยมเรียกว่าเซลล์รอยต่อเฮเทโร แสดงรูปการณระดับพลังงานของควอนตัมดอทดังรูปที่ 2.4 และยังได้มีการผสมผสานฟิล์มบางโครงสร้างควอนตัมดอทให้อยู่ระหว่างรอยต่อ p-n เรียกว่า intermediate band แสดงโครงสร้างแถบพลังงาน เพื่อให้เกิดระดับพลังงานควอนตัมเป็นเหตุให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงขึ้น แต่ปัญหาของการเดินทางของพาหะผ่านส่วนรอยสัมผัสผิว (Interfacial charge transportation) เกิดจากการสูญเสียในกระบวนการรวมตัวใหม่ซึ่งการถ่ายโอนของพาหะไม่มากพอและอัตราการส่งผ่าน electron-hole ไม่เหมาะสม (Mismatch transfer rate) จุดบกพร่องของฟิล์มบางควอนตัมดอทมีผลอย่างมากต่อการลดลงของประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเช่นเดียวกัน ดังนั้นเราอาจกล่าวได้ว่าคุณภาพที่ดีของฟิล์มบางควอนตัมดอทขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์ม เพื่อให้ได้โครงสร้างผลึกขนาดเล็กที่สมบูรณ์ เป็นวัสดุที่ตอบสนองต่อแสง (Sensitizing materials) ในของเขตช่วงกว้าง กับการออกแบบแถบพลังงานช่องว่างที่เหมาะสม และชนิดของสารประกอบเพื่อให้เกิดการส่งผ่านพาหะ electron-hole ที่ดี รวมถึงวัสดุจะต้องมีสภาพนำไฟฟ้าที่ดี

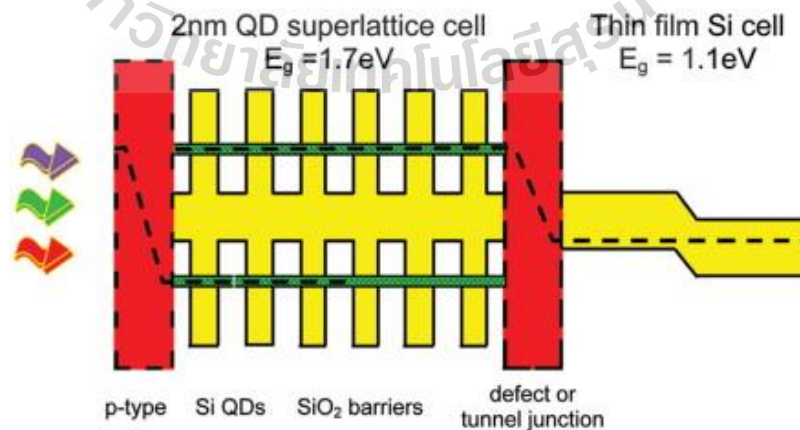


รูปที่ 2.4 แถบพลังงานของของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดควอนตัมดอทแบบ heterojunction cell

หลักการซ้อนทับกันของชั้นฟิล์มควอนตัมดอท (Quantum dots tandem cells) เพื่อตอบสนองแสงในความยาวคลื่นในช่วงต่าง ๆ กัน สามารถแสดงแผนภาพการตอบสนองและการส่งผ่านแสงของชั้นฟิล์มควอนตัมดอทแบบซ้อนทับกัน ดังรูปที่ 2.5 เซลล์ได้รับพลังงานแสงที่ความยาวคลื่นยาวจะได้รับการตอบสนองในบริเวณรอยต่อของเซลล์ที่มีช่องว่างพลังงานกว้างกว่าชั้นอื่น ๆ ส่วนความยาวคลื่นแสงสั้นกว่าจะทะลุผ่านไปยังชั้นรอยต่อที่สอง การเกิดในลักษณะเช่นนี้จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างของการจัดเรียงแถบพลังงานช่องว่างของ Quantum dots tandem cell ที่ประกอบด้วย Si quantum dots ฝังในเมตริกซ์ของ SiO_2 เกิดการเชื่อมต่อของแถบพลังงาน ทำให้ค่ากว้างขึ้น ($E_g = 1.7 \text{ eV}$) เรียกว่า Quantum dots superlattice cells ในส่วนนี้จะตอบสนองแสงในช่วงคลื่นพลังงาน 1.7eV ได้ดี และแสงที่มีพลังงานสั้นกว่าจะทะลุผ่านไปยังชั้นฟิล์มรอยต่อ p/n Si



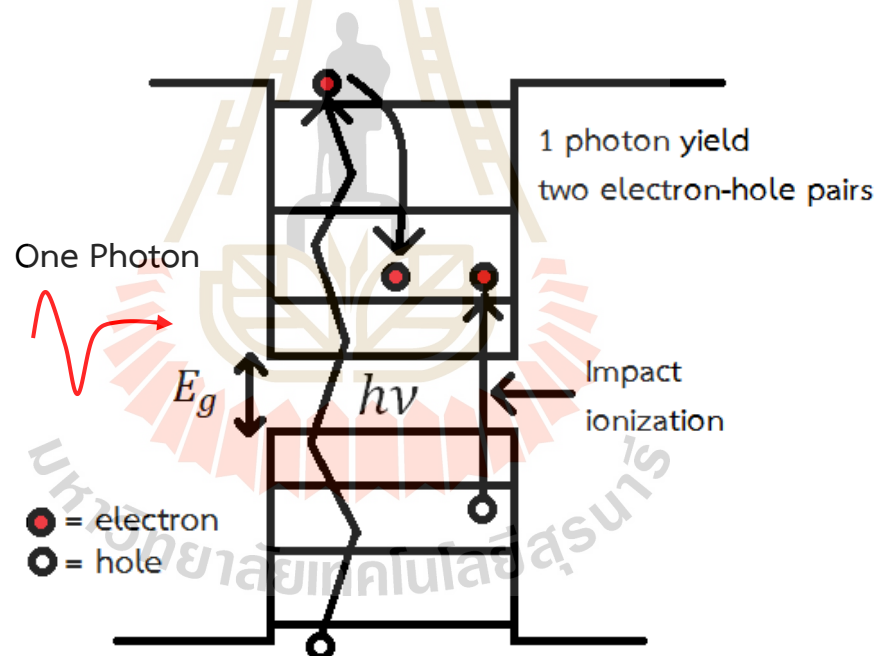
รูปที่ 2.5 ลักษณะการตอบสนองของ Quantum dots tandem cells ที่มีช่องว่างพลังงานบริเวณรอยต่อต่าง ๆ (Green, M.A., 2009)



รูปที่ 2.6 การจัดเรียงแถบพลังงานของ Quantum dots tandem cells 2 เซลล์ (Gavin Conibeer 2010)

Nozik A. ปี ค.ศ. 2002 ได้กล่าวไว้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทมีศักยภาพที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจากการเปลี่ยนระดับพลังงานควอนไทซ์ได้ถึง 66% จากประโยชน์ของ hot carriers ภายใต้อุณหภูมิสูง จากกระบวนการ impact ionization ที่พลังงานในแถบย่อย และรวบรวม hot carriers ในบริเวณขั้วไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ก่อนคายพลังงานกลับไปยังที่ขอบแถบพลังงาน (Band edge)

นอกจากวิธีดังกล่าวในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการลดการสูญเสียเชิงความร้อนของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากการดูดกลืนพลังงานที่มากกว่าค่าพลังงานช่องว่าง ด้วยการสร้างรอยต่อหลายชั้นและยังสามารถใช้ประโยชน์จากรวบรวม hot carrier ซึ่งเกี่ยวข้องกับ 2 กระบวนการคือ 1. ต้องการพาหะ electron-hole ที่มาจากการแปลงพลังงานแสง (Photoconvector) ก่อนเย็นตัว และ 2. ต้องการพลังงานจาก hot carrier เพื่อผลิตคู่อิเล็กตรอน-โฮล มากกว่าปกติ จากกระบวนการ impact ionization ซึ่งเป็นกระบวนการผันกลับของกระบวนการออร์เจอร์ (Auger) กล่าวคือวัสดุ QDs ดูดกลืนโฟตอนพลังงานสูงค่าหนึ่ง เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ระดับชั้นพลังงานสูง จากนั้นคายพลังงานกลับลงในชั้นพลังงานที่เกิดการควอนไทซ์ และส่งถ่ายพลังงานเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล 2 คู่หรือมากกว่านั้น แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กลไกการผลิต Multiple carriers ใน QDs การถ่ายโอนพลังงานให้กับคู่อิเล็กตรอน - โฮล ของโครงสร้างควอนตัมดอทด้วยกระบวนการ impact ionization

2.2 กลไกการสูญเสียภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น

ปรากฏการณ์ Photo-electric หรือ Photovoltaic เป็นการอธิบายทฤษฎีจาก อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ ซึ่งได้นำทฤษฎีพื้นฐานทางแสงของ Planck ที่ได้รับรางวัลโนเบลในปี 1918 มาร่วมสัมพันธ์กัน และอัลเบิร์ต

ไอน์สไตน์ได้ให้นิยามของแสงเป็นก้อนพลังงานเรียกว่าโฟตอน เป็นผลให้ไอน์สไตน์สามารถอธิบายปรากฏการณ์ Photovoltaic สำเร็จ และได้รับรางวัลโนเบลในปี 1921 โดยได้กล่าวว่าแสงมีสมบัติ 2 อย่างพร้อมกัน (duality properties) คือสมบัติความเป็นคลื่นและอนุภาค เมื่อแสงหรือพลังงานโฟตอนตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น เซลล์จะสามารถแปลงพลังงานโฟตอนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง แต่มีข้อจำกัดหลักคือพลังงานโฟตอนที่ถูกดูดกลืนได้ในเซลล์สามารถใช้ประโยชน์ได้นั้นอยู่ในช่วงความยาวคลื่นจำกัด คือพลังงานโฟตอนมากกว่าค่า E_g ของวัสดุรอยต่อพี-เอ็น สำหรับกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็นนั้น แสงที่ตกกระทบและเซลล์สามารถดูดกลืนได้ต้องมีช่วงความยาวคลื่นแสงที่สั้นกว่า 1,127 nm นั่นคือมีพลังงานโฟตอนมากกว่า 1.1 eV (E_g ของ Si) สมการที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์แบบผกผันระหว่างพลังงานโฟตอนของแสงและความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.4)$$

โดยที่ E คือ พลังงานโฟตอน (eV)

h คือ Planck's constant = 6.62×10^{-17} erg.sec = 4.5×10^{-15} eV.sec

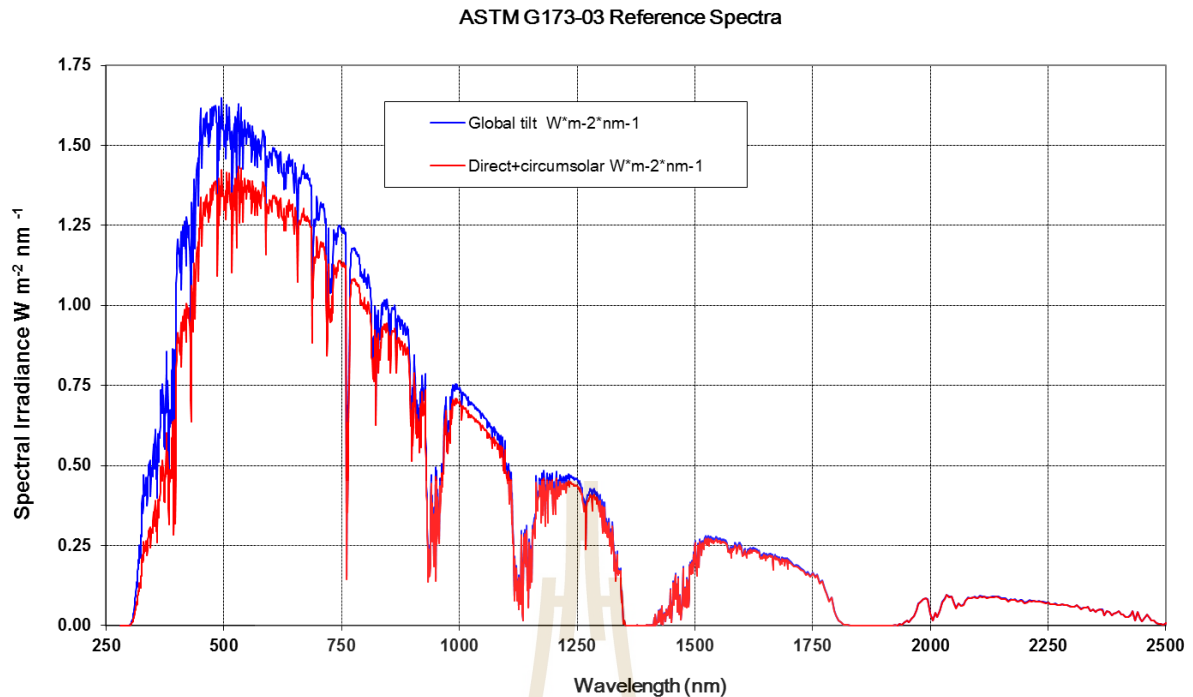
c คือ ความเร็วแสง = 2.998×10^8 m/sec

λ คือ ความยาวคลื่น (nm)

ν คือ ความถี่ของพลังงานโฟตอน (Hz)

แสงมีระดับค่าความเข้ม (irradiation intensity) ที่แตกต่างกันในแต่ละค่าความยาวคลื่นแสดงสเปกตรัมของค่าความเข้มแสงในรูปที่ 2.8 เส้นสีฟ้าของ AM1.5 Global spectrum พิจารณาใช้กับแผงรับแสงแบบเรียบ (Flat plate modules) ผลรวมของกำลังงาน (Integrated power) เท่ากับ 1000 W/m^2 (100 mW/cm^2) ในส่วนของเส้นสีแดงของ AM1.5 Direct (+circumsolar) spectrum แสดงถึงงานที่ประกอบด้วยชุดแผ่นรวบรวมแสงและลำแสงอาทิตย์แบบตรง ลักษณะนี้มีผลรวมของกำลังงานเท่ากับ 900 W/m^2 จากกราฟจะเห็นว่าความเข้มของแสงมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงความยาวคลื่นแสงมองเห็นได้ (Visible wavelength) โดยเฉพาะย่านความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงิน

หลักการจำกัดค่าประสิทธิภาพของ Carnot ได้กล่าวว่าพลังงานจากดวงอาทิตย์สามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้ากับค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงถึง 95% เข้าใกล้ข้อจำกัดของ Carnot เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 1 รอยต่อพี-เอ็น (single junction solar cell) แล้วพบว่าถูกจำกัดที่ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงได้ถึงขอบความยาวคลื่น ซึ่งจะไม่เกิน 1,127 nm และแสงที่ดูดกลืนได้นั้นอาจจะไม่สามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งหมด ทำให้ประสิทธิภาพทางทฤษฎีมีค่าไม่เกิน 31% เนื่องจากเกิดกลไกการสูญเสียภายในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 1 รอยต่อพี-เอ็น แสดงภาพได้ดังรูปที่ 2.9 เราสามารถแบ่งประเภทกลไกการสูญเสียพลังงานภายในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 1 รอยต่อนี้ได้เป็น 4 ส่วนใหญ่ ดังนี้



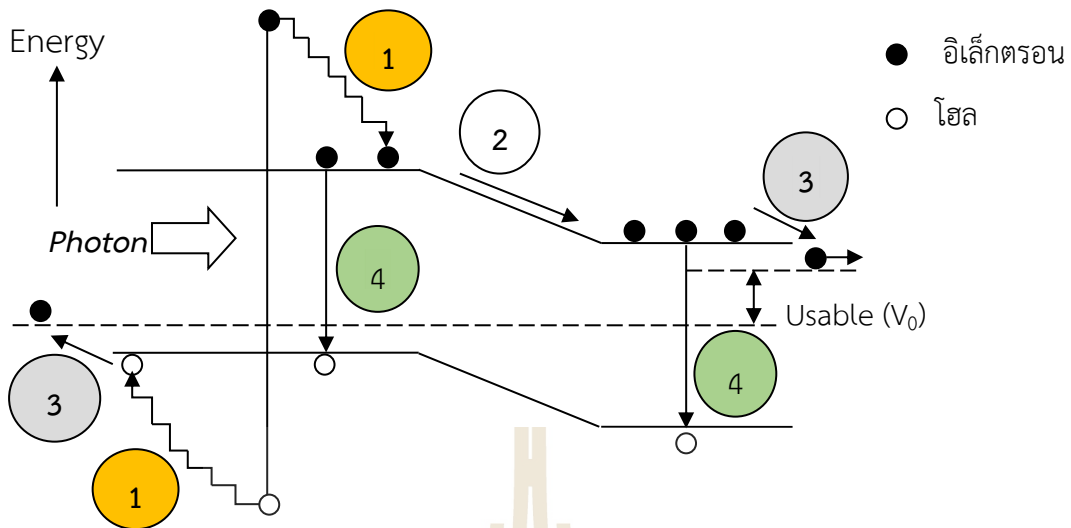
รูปที่ 2.8 สเปกตรัมความเข้มแสงที่ส่องสว่างจากดวงอาทิตย์ในความยาวคลื่นช่วงกว้างที่ผ่านชั้นบรรยากาศตามมาตรฐาน

1. การสูญเสียเชิงความร้อน เนื่องจากพลังงานโฟตอนที่ดูดกลืนนั้นมากกว่าค่า E_g วัสดุรอยต่อพี-เอ็น ($\lambda < 1127 \text{ nm}$) ทำให้เกิดพาหะที่ได้รับการกระตุ้นด้วยพลังงานโฟตอนที่สูงกว่าขอบของแถบพลังงานคอนดักชัน (conduction energy band edge, E_C) และขอบของแถบพลังงานวาเลนซ์ (valence energy band edge, E_V) แสดงกลไกในหมายเลข 1 และ 1' ซึ่งพาหะเหล่านี้จะคลายพลังงานโฟนอน และตกกลับลงขอบ E_C และ E_V

2. การสูญเสียที่รอยต่อพี-เอ็น เนื่องจากการเคลื่อนที่ของพาหะบริเวณรอยต่อด้วยกระแสไฟฟ้าแบบพัดพา (drift) ของสนามไฟฟ้าและเมื่อพาหะเคลื่อนที่ออกนอกรอยต่อเข้าสู่เนื้อวัสดุของเซลล์ เมื่อพาหะอิเล็กตรอน-โฮล เคลื่อนที่ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบแพร่ (diffusion) เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกบริเวณรอยต่อ จึงเกิดการสูญเสียพาหะไปบางส่วนจากการจับ (trap) เนื่องจากมีจุดบกพร่องในเนื้อวัสดุและที่ผิว กลไกดังกล่าวแสดงในหมายเลข 2

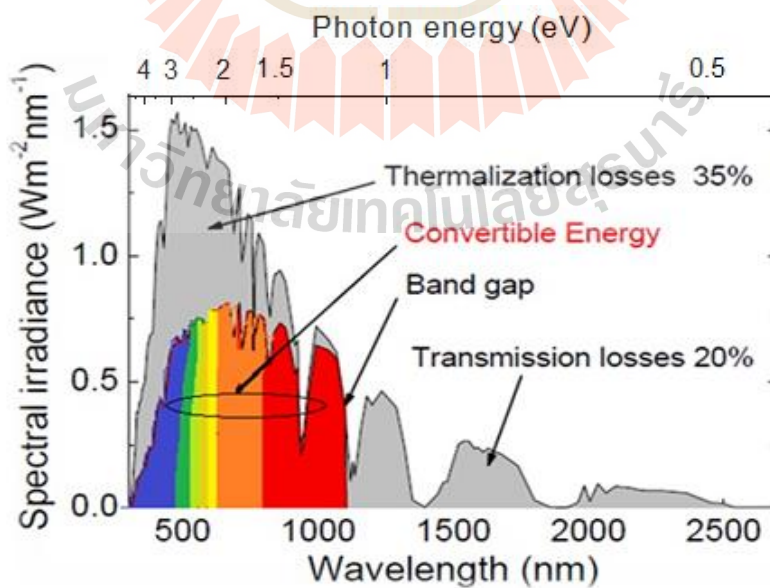
3. การสูญเสียแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วโลหะสัมผัส เนื่องจากมีความต้านทานไฟฟ้าระหว่างรอยสัมผัสและขั้วโลหะ กลไกนี้แสดงในหมายเลข 3 และ 3'

4. การสูญเสียจากการรวมตัวใหม่ของพาหะ (recombination) ที่ได้รับการกระตุ้นจากแสงโฟตอน แต่ไม่เสถียรขณะเดินทางไปยังขั้วไฟฟ้าทำให้พาหะเหล่านั้นตกกลับ หรือเรียกว่าการรวมตัวใหม่ แสดงกลไกนี้ในหมายเลข 4 และ 4'



รูปที่ 2.9 กลไกการสูญเสียประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งรอยต่อ (ภาพจากหนังสือ Third generation photovoltaic advanced energy conversion, M.A. Green, Springer)

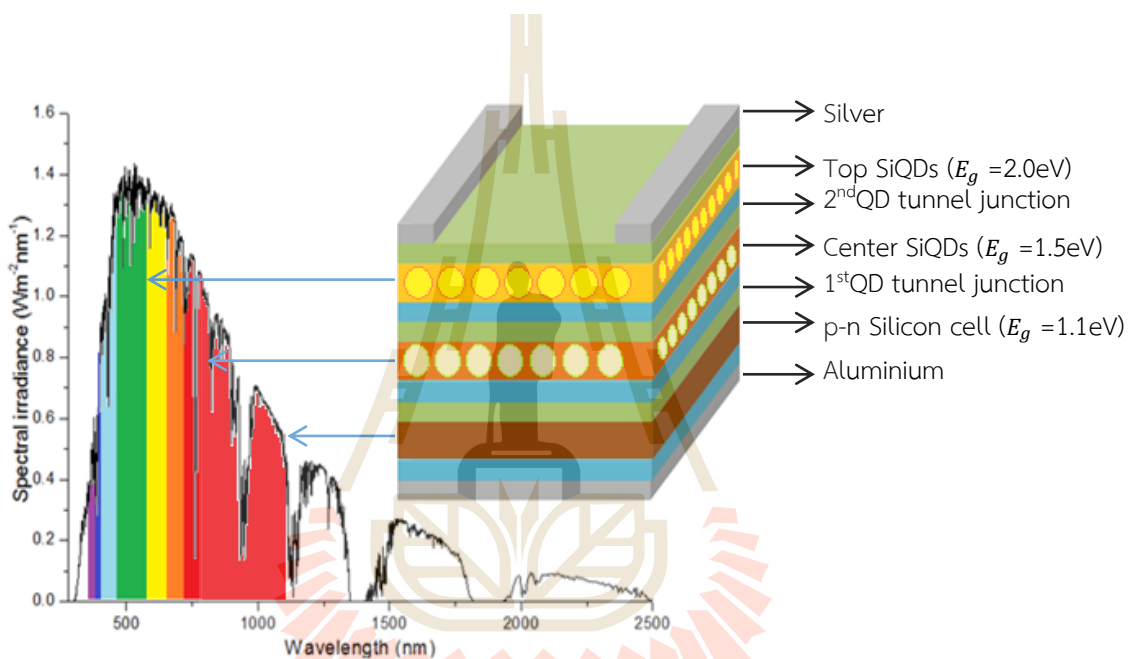
จากข้อจำกัดการแปลงพลังงานจากกลไกการสูญเสียต่าง ๆ พบว่าการสูญเสียเชิงความร้อน (Thermalization loss) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนในช่วงพลังงานโฟตอน $E_{ph} > E_g$ มีค่าสูงถึง 35% มีค่ามากกว่าการสูญเสียแบบทะลุผ่าน (Transmission loss) ที่แสงอาทิตย์ที่มี $E_{ph} < E_g$ แสดงบริเวณการสูญเสียในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบสเปกตรัมแสงพระอาทิตย์ กับบริเวณช่วงความยาวคลื่นที่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนสามารถแปลงพลังงานได้ และบริเวณการสูญเสียต่าง ๆ

2.3 หลักการของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนาโนซิลิคอนคอตท

จากคุณสมบัติการดูดกลืนแสงในระดับพลังงานกว้างของวัสดุสารกึ่งตัวที่ประกอบด้วยผลึกนาโนขนาดเล็กฝังอยู่ในวัสดุฉนวน ทำให้มีการศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการใช้วัสดุโครงสร้างนาโนควอนตัมคอตทมาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเทนเดมซิลิคอนที่มีโครงสร้างซ้อนทับกันหลายๆ ชั้น แสดงดังรูปที่ 2.11 จะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) สูงขึ้นประมาณ 0.8 V ถึง 0.9 V ซึ่งมีค่าสูงกว่ากรณีเซลล์ชนิดผลึกซิลิคอน ($V_{oc} = 0.5$ V ถึง 0.6 V) และเรียกเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างเช่นนี้ว่า “โครงสร้างเทนเดม (tandem structure)” โครงสร้างของซิลิคอนควอนตัมคอตทนี้จะช่วยแก้ไขให้รอยต่อพี-เอ็น มีจุดบกพร่องน้อยที่สุด



รูปที่ 2.11 สเปกตรัม AM1.5G และการตอบสนองความยาวคลื่นในช่วงต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนาโนซิลิคอนเทนเดมเซลล์

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบหนึ่งรอยต่อไม่เพียงแต่จะมีค่าช่องว่างพลังงานค่าหนึ่งเท่ากับ 1.1 eV เท่านั้น ทำให้ถูกจำกัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานอยู่ในระดับต่ำหรือเท่ากับ 29 % (Green, M. A., 2001) ในปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้น เช่น การเคลือบวัสดุลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้า การทำโครงสร้างพื้นผิวขรุขระเพื่อเพิ่มพื้นที่รับแสง และการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบซ้อนทับกัน ซึ่งจะมีผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเพิ่มขึ้นกว่าเดิมร้อยละ 13 ถึง ร้อยละ 18 จากงานวิจัยของ (Park, S., 2009) ที่ผ่านมาสามารถคำนวณประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนโครงสร้างเทนเดมที่

ประกอบไปด้วย 2 เซลล์ และ 3 เซลล์ โดยมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเท่ากับ 42.5% และ 47.5% สำหรับ 2 เซลล์ และ 3 เซลล์ ตามลำดับ

โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนาโนซิลิคอนเทนเดมเซลล์ที่ประกอบไปด้วยเซลล์ที่ซ้อนทับกัน 2 ชั้น โดยควบคุมให้ช่องว่างพลังงานแคบลงจาก 2 eV 1.5 eV และ 1.1 eV ตามลำดับ เมื่อจัดลำดับจากด้านรับแสงลงมา สำหรับความหนาของชั้นพีและเอ็นนั้นกำหนดให้คงที่ ส่วนชั้นบนสุดเป็นชั้นเอ็นหรือชั้นอิมิตเตอร์ (Emitter layer) ซึ่งเป็นชั้นที่มีระดับพลังงานเฟอร์มิอูกลีแแถบพลังงานคอนดักชัน และมีสภาพนำไฟฟ้าสูงมากจึงทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากขึ้น ส่วนกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจะถูกกำหนดโดยเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ให้กระแสไฟฟ้าขาออกน้อยที่สุด เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชั้นที่หนึ่งจะได้รับความเข้มแสงมากที่สุด ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ลึกเข้าไปด้านล่างจะได้รับความเข้มแสงลดลงตามสมการเอกซ์โพเนนเชียล เนื่องจากมีการสูญเสียพาหะขณะข้ามรอยต่อ ดังนั้นชั้นซิลิคอนควอนตัมดอทจำเป็นต้องมีความหนาที่น้อยอย่างเหมาะสม มีค่ากระแสโฟโตสูงจากวัสดุตัวกลางเมตริกซ์ที่ให้คุณสมบัติแสง-ไฟฟ้าที่ดี เพื่อลดผลการบังแสงของชั้นซิลิคอนควอนตัมดอท

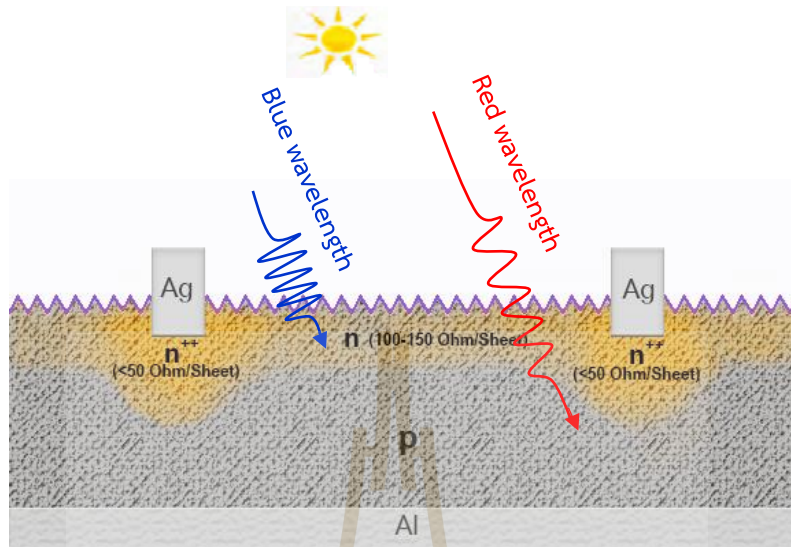
2.4 หลักการของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Selective Emitter

จากการคาดการณ์ของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคตพบว่า โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีลักษณะแบบ Selective emitter (SE solar cells) เนื่องจากเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ให้ประสิทธิภาพสูงกว่า 19% และคาดว่าจะผลิตออกจำหน่ายมากขึ้น [Mason N. (2009)] โดยในปี ค.ศ. 2014 พบว่าการผลิต SE Solar cells เกินกว่า 2.5 GW แล้ว และมีแนวโน้มว่าเทคโนโลยีใหม่นี้จะแทนที่เทคโนโลยี 17% solar cell ในไม่ช้า [<http://www.solarbuzz.com>] รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบ SE ซึ่งสามารถการตอบสนองการตอบสนองสเปกตรัมแสงสีน้ำเงินที่บริเวณชั้น n-emitter ที่แพร่สารเจือต่ำ ส่วนสเปกตรัมแสงสีแดงจะตอบสนองได้ดีที่บริเวณชั้น p-substrate ทำให้เกิดประสิทธิภาพเชิงควอนตัมที่ดีขึ้น ในย่านแสงสีน้ำเงินแสดงในกราฟที่ 2.13 ดังนั้นในโครงสร้างของชั้นรับแสง (Emitter layer) ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ SE สามารถพิจารณาส่วนหลักได้เป็น 2 บริเวณคือ

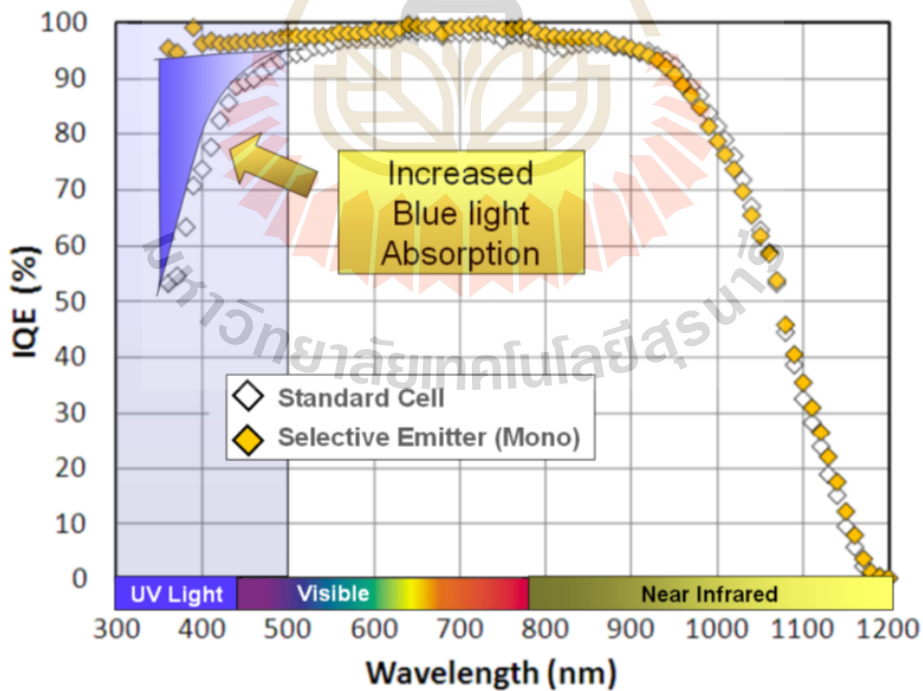
1. บริเวณแพร่สารเจือต่ำ (Lightly doped region) เป็นด้านที่รับแสงที่มีค่า ρ_{sheet} ไม่ต่ำกว่า 100 Ω/sheet มีสมบัติการแปลงพลังงานเชิงควอนตัมในช่วงแสงความยาวคลื่นสั้น (Blue wavelength) ได้ดี ทำให้เกิดการแปลงพลังงานได้มากขึ้น เนื่องจากที่ความหนาแน่นสารเจือต่ำทำให้เกิดอัตราการรวมตัวของพาหะต่ำ (Low recombination) ส่งผลให้ผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น

2. บริเวณแพร่สารเจือสูง (Heavily dope region) เป็นบริเวณที่อยู่ด้านล่างของขั้วไฟฟ้า มีค่า ρ_{sheet} น้อยกว่า 50 Ω/sheet เพื่อให้เกิดคุณสมบัติ Ohmic contact ที่บริเวณรอยสัมผัส ทำให้มีค่าความ

ต้านทานไฟฟ้าที่รอยสัมผัสลดลง ส่งผลให้ความต้านทานอนุกรม (Series resistance, R_s) ลดลง และ Fill factor (FF) สูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงขึ้น



รูปที่ 2.12 บริเวณการตอบสนองแสงคลื่นสั้นและคลื่นยาวของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Selective emitter



รูปที่ 2.13 การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (Internal Quantum Efficiency, IQE) บริเวณสเปกตรัมแสงย่านความยาวคลื่นสั้นของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Selective emitter

ตารางที่ 2.1 แสดงผลประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Selective emitter ในวิธีการผลิตแบบต่าง ๆ เราจะพบว่าการผลิตด้วยวิธีการพิมพ์ลาย (Screen printing) เป็นวิธีต้นทุนต่ำจากการใช้สารในรูป Sol-gel หรือ Paste ได้ และมีขั้นตอนไม่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่า 19% ซึ่งมีค่าสูงกว่าเซลล์ที่ผลิตจากโครงสร้างมาตรฐาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษการสังเคราะห์หมึกซิลิคอนคอตเพื่อเป็นสารตั้งต้นของการพิมพ์ลายของแหล่งสารเจือเข้มข้นสูงให้กับบริเวณที่อยู่ใต้ขั้วไฟฟ้า ทำให้สามารถสร้างชั้นรับแสง n-emitter ให้มีค่าความต้านทานแผ่นสูงขึ้น ($>100 \Omega/\text{sheet}$) โดยไม่กระทบต่อผลของ FF ในเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 2.1 ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Selective emitter ในวิธีการผลิตแบบต่าง ๆ

| คณะผู้วิจัย | $\eta(\%)$ | วิธีที่ใช้สร้างบริเวณ SE |
|--------------------------------|------------|--------------------------|
| Kim et al.(2014) | 19.2 | Laser process |
| Röder et al.(2010) | 18.0 | |
| Lee et al.(2011) | 19.0 | |
| Lin et al.(2014) | 20.0 | |
| Dastgheib-Shirazi et al.(2008) | 18.1 | Etch Back process |
| Song et al.(2012) | 18.1 | |
| Kim et al.(2014) | 18.2 | |
| Dullweber et al.(2016) | 21.6 | |
| Lee et al.(2011) | 19.0 | Screen printed |
| Antoniadis et al.(2010) | 18.9 | |
| Zhong et al.(2013) | 19.13 | |

บทที่ 3

การผลิตหมึกซิลิคอนดอท และวิเคราะห์ผลของคุณลักษณะทางจุลโครงสร้าง

3.1 บทนำ

ปัจจุบันการฟิล์มบางที่ใช้ในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นั้นผลิตด้วยเทคนิคการเคลือบด้วยไอเคมีแบบ Pressure enhance chemical vapor deposition (PECVD) ภายใต้สุญญากาศพิเศษ เพื่อสร้างชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับที่ผิวด้านบนเซลล์ (Anti-reflection coating, ARC) ส่วนการสร้างบริเวณชั้นโลหะสำหรับรวบรวมพาหะอิเล็กตรอน-โฮลและเป็นกระแสไฟฟ้านั้น ผลิตจากการพิมพ์ด้วยหมึกโลหะเงิน และอะลูมิเนียม จะได้ลวดลายบริเวณของโลหะตามต้นแบบ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้กันมากกว่า 30 ปี เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่พึ่งพาเทคโนโลยีฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ จัดเป็นเทคนิคที่มีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับขั้นตอนอื่น ๆ

ส่วนประกอบหลักของหมึกนาโนประกอบด้วยผงซิลิคอน (Si powder) สารประสาน (Blinder) สารละลาย (Solvent) และสารลดแรงตึงผิว (Additive) ผงซิลิคอนเป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็กกว่า $1 \mu\text{m}$ สามารถผลิตจากวิธีบด (Milling or grinding technique) วิธีสลายก๊าซไซเลนเป็นผงของแข็งด้วยพลาสมาแบบ Non-thermal plasma ในปัจจุบันผงนาโนซิลิคอนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ อย่างกว้างขวางเช่น นำคุณสมบัติทางแสงใช้ในด้านพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นฟิล์มบางของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้านชีวภาพทางการแพทย์ (Biomedical) ตัวตรวจรู้ทางชีวภาพ (Biosensor) รวมถึงอุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิดลิเทียม-ไอออน เป็นต้น ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการผลิตผงนาโนซิลิคอนด้วยวิธีการบด และศึกษาสมบัติทางจุลโครงสร้าง เพื่อเป็นเมล็ดอนุภาคของแข็งในสารละลายหมึกนาโนซิลิคอน ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดของการผลิตหมึกและการเคลือบเป็นฟิล์มบางในบทที่ 4 ต่อไป

3.2 การผลิตผงซิลิคอนด้วยวิธี Grinding Balls

การผลิตผงซิลิคอนด้วย Zirconia Grinding Balls เป็นวิธีการผลิตผงขนาดเล็กด้วยการบด ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และต้นทุนต่ำกว่าวิธีอื่น การศึกษานี้ได้ใช้แผ่นซิลิคอนที่เสื่อมสภาพ หรือแผ่นที่เสียหายสามารถนำมารีไซเคิล เพื่อผลิตเป็นผงซิลิคอน โดยขั้นแรกนำแผ่นซิลิคอนมาทำความสะอาดด้วยวิธี Radio Corporation of America (RCA) (Kern W. และคณะ ปี ค.ศ. 1978) และ (Kern W. ปี ค.ศ. 1993) ซึ่งมีกระบวนการ 2 ขั้นตอนคือ RCA1 และ RCA2 ดังนี้

RCA1 คือการทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนและแผ่นฐานรองเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ (Organic) มีส่วนผสมของสารประกอบของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) และน้ำที่ปราศจากไอออน (DI, Deionized water) มีอัตราส่วนเท่ากับ 1 : 1 : 5 ตามลำดับ

จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนแช่ลงในสารละลายที่ผสมกันและให้ความร้อนที่ 70°C นาน 10 นาที หลังจากนั้นล้างแผ่นซิลิคอนด้วยน้ำ DI โดยให้น้ำไหลผ่านนาน 3 ถึง 5 นาที

RCA2 คือการทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนและแผ่นฐานรองเพื่อกำจัดไอออนของโลหะ (Metal ions) มีส่วนผสมของสารประกอบของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และน้ำ DI มีอัตราส่วนเท่ากับ 1 : 1 : 5 ตามลำดับ จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนลงแช่ในสารละลายที่ผสมกันและให้ความร้อนที่ 70°C นาน 10 นาที หลังจากนั้นล้างแผ่นซิลิคอนด้วยน้ำ DI โดยให้น้ำไหลผ่านนาน 3 ถึง 5 นาที และเป่าแผ่นซิลิคอนให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์

ภายหลังแผ่นซิลิคอนไม่มีสารเจือปนอย่างโลหะและสารอินทรีย์ที่ผิวของแผ่นแล้ว นำไปบดด้วยโกร่งบดสารแสดงในรูปที่ 3.1 (ก) บดย่อยแผ่นซิลิคอนให้มีขนาดเล็กลง หลังจากนั้นทำการบดย่อยอีกครั้งให้ได้ขนาดเล็กลงอีก ด้วยกระบวนการบดละเอียดด้วยลูกบด (ball milling) แสดงในรูปที่ 3.1 (ข) โดยใช้หลักการหมุนของหม้อบด ภายในมีลูกบดและเอทานอล หม้อบดจะหมุนในแนวนอน ทำให้ลูกบดกระทบกับผงซิลิคอนทำให้มีขนาดเล็กลง และใช้ระยะเวลาการบดต่าง ๆ ตั้งแต่ 43 72 และ 96 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะได้ผงซิลิคอนในสารละลายเอทานอล และนำซิลิคอนที่ได้จากการบดเข้าเตาอบ เพื่อให้เอทานอลระเหยออกไปจนหมด แล้วทำการร่อนผงซิลิคอนให้ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 mesh ซึ่งมีขนาดตาข่ายผ่าน 45 ไมครอน แสดงในรูป 3.1(ค)



รูปที่ 3.1 (ก) โกร่งบดแผ่นซิลิคอน (ข) อุปกรณ์บดผงด้วย Milling balls (ค) ผงซิลิคอนที่ได้จากการบด

เมื่อทำการทดสอบใช้แผ่นซิลิคอนที่หักเสียหายที่มีน้ำหนักรวม 51.661g ผ่านกระบวนการบด 96 ชั่วโมง พบว่าผงที่ได้มีน้ำหนักรวมอยู่ที่ 45.493g ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ผลผลิต (%yield) เท่ากับ 88.06% ซึ่งให้ค่าสูง เนื่องจากไม่เกิดการเกาะที่ขอบฝาเกลียวและไม่ฟุ้งกระจายเมื่อเทียบกับการบดแบบแห้งที่ไม่มีส่วนของสารละลายเอทานอล

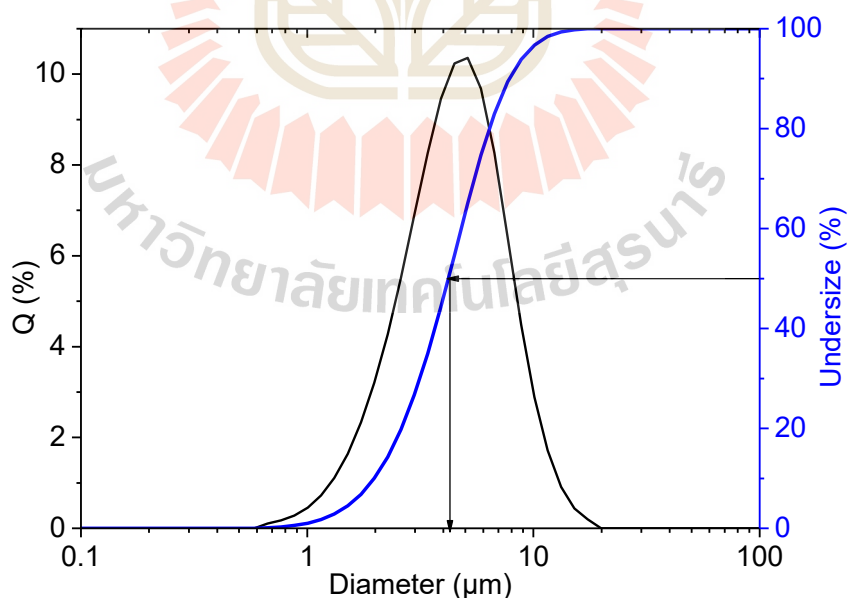
3.3 คุณสมบัติทางจุลโครงสร้างของผงซิลิคอน

ในงานนี้ได้ทำการศึกษาวัดขนาดของผงซิลิคอนที่ผลิตได้ด้วยเทคนิคการวัดอนุภาคด้วยการเลี้ยวเบนของแสง และศึกษาคุณภาพของผลึกด้วยเทคนิคการวัดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ รวมถึงสามารถประมาณค่าขนาดผลึกซิลิคอนได้จากการคำนวณด้วยสมการ Scherrer ลักษณะของสเปกตรัม XRD นำไปสู่การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างผลึกซิลิคอนได้ เช่นค่า Lattice constant (a) ค่า Strain ของฟิล์มในแนวแกน c และระยะระหว่างชั้นของอะตอม ($d_{h,k,l}$) เป็นต้น

3.3.1 การวัดขนาดของผงซิลิคอนด้วยเทคนิค Particle Size Analysis

ผงซิลิคอนที่ผลิตได้นำมาวัดขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Particle Size Analysis รุ่น LA – 905 การวัดขนาดอนุภาคใช้หลักการการเลี้ยวเบนของแสง (Laser Diffraction Technique) โดยให้ผงซิลิคอนกระจายตัวในสารละลายเอทานอล และกำหนดค่าดัชนีหักเหของแสง (Refractive index) ของซิลิคอนและเอทานอลเท่ากับ 3.42 และ 1.36 ตามลำดับ

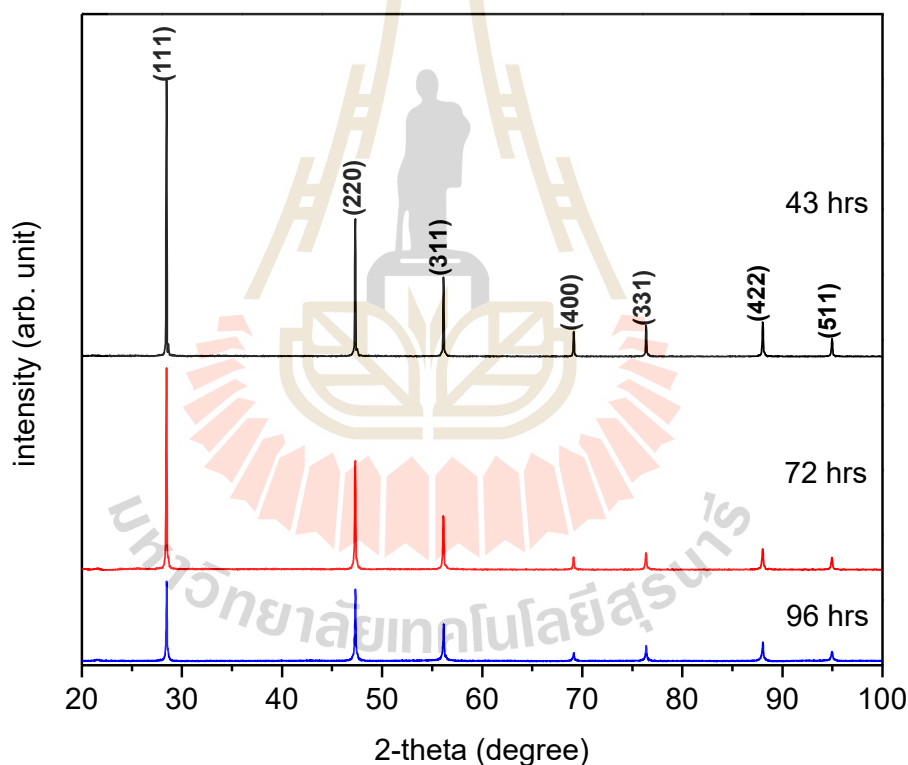
รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคในระดับไมครอน และค่าเปอร์เซ็นต์ความถี่ในการพบอนุภาค (%Q) และค่าเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่พบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า (%Undersize) จากผลการวัดพบว่าการวัดที่ได้มีลักษณะแบบ Gaussian ที่สมมาตร มียอดสัญญาณซึ่งแสดงการกระจายตัวมากที่สุดของผงซิลิคอนในสารละลายเอทานอลมีขนาด 4.2 ไมครอน ซึ่งสอดคล้องกับกราฟ Undersize ที่ตำแหน่ง 50% และพบว่าขนาดผงซิลิคอนที่พบไม่เกิน 20 ไมครอน และขนาดไม่เล็กกว่า 0.7 ไมครอน



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความถี่ในการพบอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาคที่วัดจากเครื่อง Particle Size Analysis

3.3.2 การวัดคุณภาพผลึกของผงซิลิคอนด้วยเทคนิค X-ray diffraction

คุณสมบัติความเป็นผลึก และขนาดผลึกซิลิคอนของผงที่ผลิตขึ้นได้ทำการวิเคราะห์ด้วยการวัดจากเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) จากเครื่องรุ่น D8 Advance Bruker ใช้โหมดการวัดแบบ Coupled two theta/theta เพื่อตรวจสอบผลึกบนพื้นผิวและในเนื้อฟิล์มบาง โดยปรับตั้งการวัด 2θ ตั้งแต่ $20^\circ - 80^\circ$ มี step การเพิ่มขึ้น 0.005° และใช้เวลาวัด 0.5sec/step สเปกตรัม XRD แสดงในรูปที่ 3.3 พบว่ายอดของสเปกตรัมตรงกับมาตรฐาน JCPDS card : 00-027-1402 ของวัสดุผลึกซิลิคอน ประกอบด้วยยอดสัญญาณที่มุม 2θ เท่ากับ 28° 47° และ 56° สอดคล้องกับระนาบ (111) (220) และ (311) ตามลำดับ จากผลการวัด XRD พบว่าผงซิลิคอนแสดงผลึกหลายรูป (Polycrystal) ซึ่งพบยอดสัญญาณสูงสุดที่ตำแหน่ง 28° ที่ผลึกระนาบ (111) ทั้ง 3 เงื่อนไข แสดงว่าพบปริมาณผลึกที่ระนาบ (111) พบมากที่สุด ผงซิลิคอนที่ผ่านการอบ 43 ชั่วโมงมีความเข้มของสัญญาณ XRD ที่สูงกว่าชิ้นงานที่ใช้เวลาการลดน้อยกว่า ซึ่งไม่มีนัยสำคัญมากเท่ากับการพิจารณาขนาดของเกรนผลึกซิลิคอน



รูปที่ 3.3 รูปแบบสเปกตรัม XRD ที่วัดได้ของผงซิลิคอนที่ผลิตได้ที่ระยะเวลาการอบต่างกัน

จากสเปกตรัม XRD สามารถนำมาคำนวณหาขนาดของผลึกโดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการ Scherrer แสดงในสมการที่ (3.1)

$$D = \frac{0.9\lambda}{B \cos \theta_B} \quad (3.1)$$

โดยที่ D คือขนาดของผลึก [nm]

λ คือความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (1.5418 Å)

B คือ ค่า Full width at half maximum ของสเปกตรัม

θ_B คือตำแหน่งมุมของจุดยอด [°]

การคำนวณพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกหาได้จากสมการโครงสร้างผลึกแบบ Cubic ซึ่งมีความยาวของโครงผลึก (Crystal lattice) a , b และ c เท่ากัน และมีมุม α , β และ γ เท่ากับ 90° จากสมการของ Bragg's law แสดงในสมการที่ (3.2) และ (3.3) จะได้ว่า

$$d_{h,k,l} = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \quad (3.2)$$

$$\frac{1}{d_{h,k,l}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (3.3)$$

จะได้ว่า

$$a = d_{h,k,l} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (3.4)$$

โดยที่ λ คือความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (1.5418 Å)

θ คือมุมที่ระนาบที่มีนัยสำคัญ เช่น (111) [°]

n คือจำนวนเต็ม 1,2,3,... ในกรณีนี้ใช้ค่าเท่ากับ 1

a คือค่าความยาวของโครงผลึก (Crystal lattice) แนวแกน a ซึ่งเท่ากับ b และ c

$d_{h,k,l}$ คือระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอมที่คำนวณได้จาก Bragg's law

การคำนวณความเครียด (Strain) ตามแนวแกน c แสดงในสมการที่ (3.5) โดยที่ Strain มีค่าเป็นลบ แสดงรูปแบบ Compression strain และถ้ามีค่าเป็นบวกแสดงรูปแบบ Tension strain

$$\varepsilon_{zz} = \frac{c - c_0}{c_0} \times 100 \quad (3.5)$$

โดยที่ ε_{zz} คือความเครียดของฟิล์มตามแนวแกน c

C คือความยาวของโครงผลึกตามแนวแกน c (c-lattice parameter) ของซิลิคอนที่ไม่มี ความเครียดมีค่าเท่ากับ 5.430 Å

C_0 คือความยาวของโครงผลึกตามแนวแกน c ของฟิล์มบางซิลิคอน

จากข้อมูลสเปกตรัม XRD ที่วัดได้สามารถนำมาคำนวณหาขนาดพบว่ามีขนาดผลึกระหว่าง 51 - 68 nm แสดงผลในตารางที่ 3.1 เมื่อนำมาผลิตฟิล์มบางเพื่อเป็นชั้นผลิตพาหะ (Carrier generation) ผลึกซิลิคอนจำเป็นต้องให้มีขนาดเล็กน้อยกว่า 10 nm จึงจะทำให้เกิดคุณสมบัติการขยายช่องว่างพลังงาน แต่

ถ้านำไปใช้เป็นบริเวณซิลิคอนสารเจือเข้มข้นสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Selective emitter จึงไม่จำเป็นต้องพิจารณาขนาดที่ต้องน้อยกว่า 10 nm

ตารางที่ 3.1 ขนาดผลึกของ Si powder ที่ผลิตด้วยวิธี Zirconia Grinding Balls

| เวลาที่ใช้ในการบดย่อย (ชั่วโมง) | ขนาดผลึกเฉลี่ย (nm) | | |
|------------------------------------|--|--|--|
| | ระนาบ (111) $2\theta \sim 28^\circ$ | ระนาบ (220) $2\theta \sim 47^\circ$ | ระนาบ (311) $2\theta \sim 56^\circ$ |
| 43 | 98.75 | 78.14 | 75.66 |
| 72 | 95.30 | 79.57 | 72.61 |
| 96 | 68.30 | 60.24 | 50.87 |

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของผลึกซิลิคอน จากผลการวัด XRD พบว่า Lattice ของผลึกซิลิคอนมีค่าเกือบเท่ากับค่า Lattice ของก้อนผลึกคือ 5.430 Å และมีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอมประมาณ 3.135 Å ผลึกมีความเครียดแบบ Compressive strain เท่ากับ 1.35

3.4 หมึกซิลิคอนดอทเข้มข้นสูง และการผลิตฟิล์มบางซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ออกไซด์

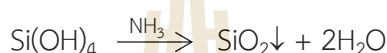
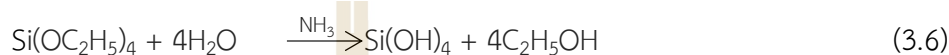
3.4.1 การสังเคราะห์หมึกซิลิคอนดอทเข้มข้นสูง

จากวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยเพื่อสังเคราะห์หมึกผสมผลึกนาโนซิลิคอนสำหรับการผลิตฟิล์มบางที่สามารถเพิ่มการตอบสนองคลื่นแสงสั้นหรือแสงสีน้ำเงินในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทหรือสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นบริเวณชั้น $n^{++}Si$ ที่มีความเข้มข้นสารเจือสูงซึ่งอยู่ใต้ขั้วไฟฟ้าด้านบนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Selective emitter เพื่อนำไปสู่การปรับปรุงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานและพัฒนากระบวนการผลิตหมึกนาโนซิลิคอนให้มีคุณภาพเพื่อเชื่อมโยงกับเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์แบบพิมพ์ลาย ในงานศึกษาได้ทำการสังเคราะห์หมึก Si dots ด้วยกระบวนการ Sol-gel เพื่อสร้างชั้นฟิล์มบางซิลิคอนดอท (Si dots) ที่ล้อมรอบด้วยเมตริกซ์ออกไซด์ โดยที่หมึก Si dots เข้มข้นสูงมีส่วนประกอบดังนี้

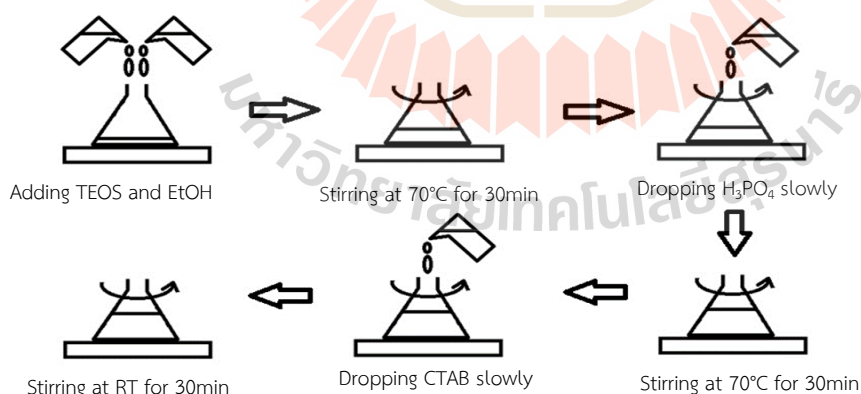
1. ผงซิลิคอนจากกระบวนการบดด้วยลูกบดเซอร์โคเนียในสารละลายเอทานอล
2. สารละลายออร์แกนิก ประกอบด้วยสาร Alpha-terpineol (TP, $C_{10}H_{16}O$, 97%) เป็นตัวทำละลายให้กับ Ethyl cellulose (EC, $C_{20}H_{42}O_6$, 48%) จะช่วยให้สารละลายเกิดความหนืด
3. สารละลายประกอบฟอสฟอรัสประกอบด้วย Phosphoric acid (H_3PO_4 , 85%) สารละลายผสมของ TEOS (Tetra ethyl orthosilicate, $Si(OC_2H_5)_4$, 98%), และ EtOH (C_2H_5OH) เพื่อเป็นเมตริกซ์ซิลิคอนไดออกไซด์ให้กับฟิล์มบางซิลิคอนดอท

4. สารละลายผสมของ Hexadecyltrimethylammonium bromide (CTAB, $C_{19}H_{42}BrN$) ที่มี Ethelene glycol (EG, $C_2H_6O_2$) เป็นตัวทำละลาย จะได้สารละลายผสม CTAB เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดหนึ่ง ทำให้ฟิล์มบางซิลิคอนดอทเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และยึดเกาะแผ่นฐานได้ดี

ปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวกับการก่อตัวของซิลิกาหรือซิลิคอนไดออกไซด์คอนลอยด์ ที่เริ่มจากสารตั้งต้นหลักของสารประกอบ Tetraethylorthosilicate (TEOS) ซึ่งมีปฏิกิริยาหลายขั้นตอนเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา Hydrolysis ของ TEOS เพื่อสร้างกรด Silicide และเอทานอล 4 mol ของ TEOS และการเกิดปฏิกิริสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ทำปฏิกิริยากับน้ำส่งผลให้เกิดการควบแน่น กับส่วนของปฏิกิริยาโพรเมอร์ ซึ่งจะสิ้นสุดลงด้วยการเกิดอนุภาค Silica และเอทานอลตามสมการด้านล่าง



การศึกษานี้ได้เตรียมสัดส่วนของละลายโดยปริมาตรของ TEOS:EtOH: H_3PO_4 เท่ากับ 7:2.1:1 ขั้นตอนแรกผสม TEOS และ EtOH ให้เข้ากันและกวนด้วยแท่งแท่งแม่เหล็ก ให้อุณหภูมิคงที่ $70^\circ C$ นาน 30 นาที จากนั้นเติมกรด H_3PO_4 และกวนต่ออีก 30 นาที จะได้ส่วนผสม Sol-gel เป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นเตรียมสารละลายลดแรงตึงผิว โดยละลาย CTAB ใน EG ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.1M เติมลงในสารละลาย Sol-gel ให้ CTAB มีค่าเท่ากับ 0.5% wt. ของ Sol-gel ขั้นตอนดังกล่าวสรุปได้ดังรูปที่ 3.4 (ก) และจะได้สารละลาย TEOS sol-gel ที่ใสแสดงในรูปที่ 3.4 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 (ก) ขั้นตอนการผลิต TEOS sol-gel และ (ข) สารละลาย TEOS sol-gel ที่ได้

การเตรียมหมึก Si dots มีสัดส่วนโดยปริมาตรของสาร TP:EC:ผงซิลิคอน:TEOS sol-gel เท่ากับ 1:0.22:0.28:0.33 ขั้นตอนแรกผสม TP EC และผงซิลิคอนรวมกัน และอบที่อุณหภูมิ $100^\circ C$ เพื่อให้สาร EC

ละลาย หลังจากนั้นเติม TOES sol-gel และกวนด้วยอัลตราโซนิก นาน 10 นาที จะได้หมึก Si dots เข้มข้นสูง แสดงในรูปที่ 3.5

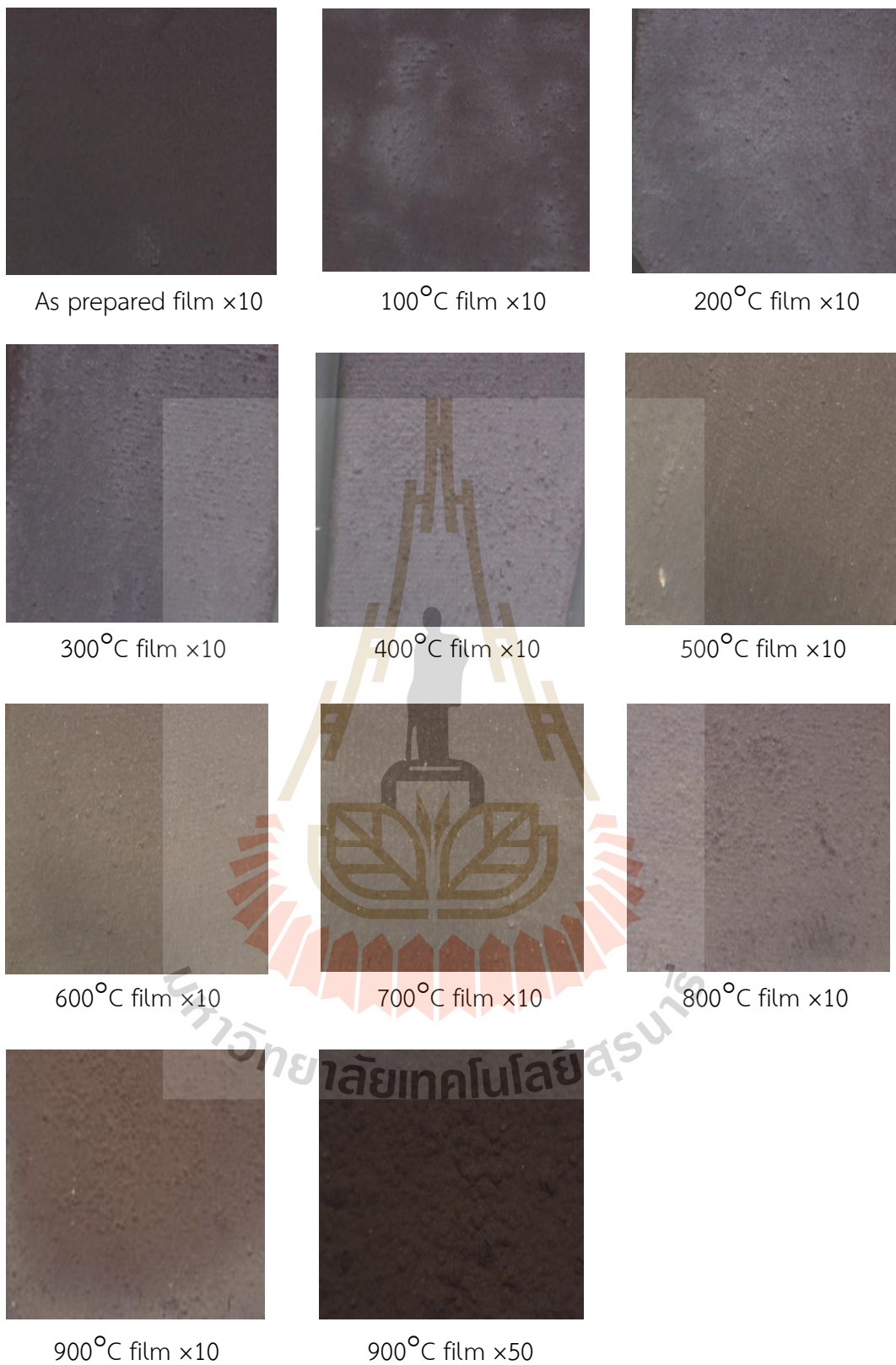


รูปที่ 3.5 หมึก Si dots เข้มข้นสูงในสารละลายอินทรีย์

3.4.2 การผลิตฟิล์มซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ออกไซด์

หลังจากสังเคราะห์หมึก Si dots เข้มข้นสูงแล้วได้นำมาเคลือบบนแผ่นควอตซ์ขนาด 2.25 cm^2 ด้วยเทคนิคการพิมพ์ลาย ผลที่ได้พบว่าฟิล์มยึดเกาะและกระจายตัวสม่ำเสมอได้ดีบนแผ่นฐานควอตซ์ แม้ว่าผิวกระจกจะมีแรงตึงผิวสูงกว่าแผ่นซิลิคอนก็ตาม เมื่อนำฟิล์มไปอบที่อุณหภูมิสูงถึง 900°C ในบรรยากาศ O_2 ที่ 100 sccm เพื่อทดสอบคุณภาพของฟิล์มในกรณีนำไปพิมพ์ลายเป็นแหล่งสารเจือในการกระบวนการแพร่ เพื่อให้ได้บริเวณ $n^{++} \text{ Si}$ ในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Selective emitter

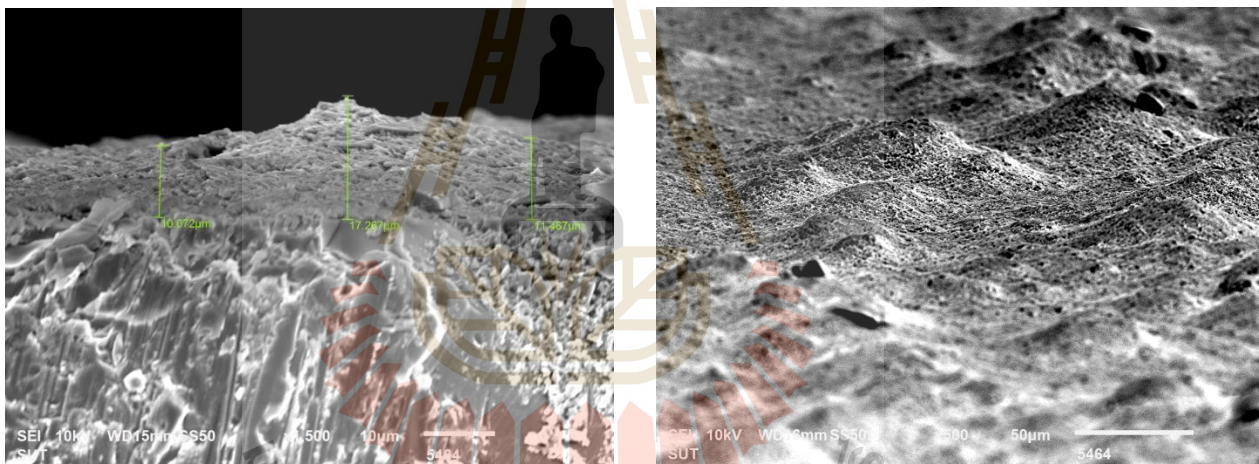
รูปที่ 3.6 แสดงภาพถ่ายจาก Optical microscope รุ่น Xenon พบว่าฟิล์มมีการเปลี่ยนสีจากสีดำเป็นสีเทาเข้มด้วยการมองจากตา เมื่อขยายภาพที่ 10 เท่า และกำลังขยาย 50 เท่า สำหรับชิ้นงานที่อบ 900°C ฟิล์มยังมีการยึดเกาะแผ่นฐานที่ดี ไม่มีรอยร้าว ฟิล์มกระจายตัวสม่ำเสมอและไม่พบการหลุดหลุดร่อนของฟิล์ม แสดงให้เห็นว่าหมึกที่สังเคราะห์ได้นั้นสามารถผลิตเป็นฟิล์ม Si dots ที่มีความหนาแน่นของผง Si สูง บนแผ่นฐานกระจกที่มีแรงตึงผิวสูงได้ ดังนั้นในกรณีที่นำฟิล์มไปเคลือบบนแผ่นฐานซิลิคอนจะไม่ส่งผลการหลุดร่อนขึ้น



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายจาก Optical microscope (x10) ของฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ออกไซด์ที่อุณหภูมิการอบ 100- 900°C

3.4.3 การวิเคราะห์จุลโครงสร้างของฟิล์มซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ออกไซด์

ฟิล์มซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ออกไซด์ผลิตด้วยวิธีพิมพ์ลายจากการใช้หมึก Si dots ในสาร TOES sol-gel ที่สังเคราะห์ขึ้นได้ในห้องปฏิบัติการ ในส่วนนี้ได้ทำการศึกษาวัดความหนาและวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณและคุณภาพ ด้วยวิธียิงลำอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) จากเครื่อง JEOL รุ่น j6010LV ก่อนทำการวัดชิ้นงานที่อบที่อุณหภูมิ 100°C ได้ทำการขัดฟิล์มด้านข้างด้วยเครื่องขัดละเอียดด้วยผงคาร์ไบด์ เพื่อวิเคราะห์ความหนาของชั้นฟิล์มในด้านตัดขวาง ผลการถ่ายภาพแสดงในรูปที่ 3.7 (ก) กำลังขยาย 1500 เท่าพบว่าฟิล์มมีความหนาประมาณ $10\ \mu\text{m}$ จากการเคลือบแบบพิมพ์ลาย (Screen printing) ซึ่งจะเป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับกระบวนการทำขั้วไฟฟ้าเงินด้านบนให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Selective emitter ดังนั้นในกระบวนการ Fast firing ที่ค่าอุณหภูมิเหมาะสม อะตอมเงินจะต้องแพร่ทะลุผ่านชั้นฟิล์มซิลิคอนดอทลงไปถึงชั้น n-Si ของเซลล์ รูปที่ 3.7 (ข) แสดงลักษณะโครงสร้างผิวขรุขระของฟิล์ม จากภาพกำลังขยาย 500 เท่า

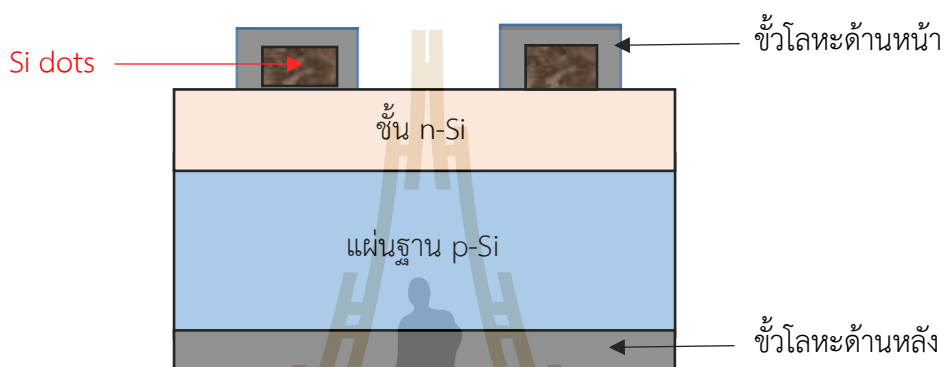


รูปที่ 3.7 ภาพถ่าย SEM JEOL รุ่น j6010 (ก) กำลังขยาย 1500 เท่า และ (ข) 500 เท่าของฟิล์มซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ออกไซด์

3.4.4 การปรับเปลี่ยนปริมาณอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสในฟิล์มซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ออกไซด์

จากจุดมุ่งหมายของการผลิตหมึกซิลิคอนเพื่อต้องการสร้างฟิล์มซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ออกไซด์สำหรับเป็นแหล่งสารเจือในบางบริเวณให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Selective emitter แสดงโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 3.8 การควบคุมปริมาณอะตอมสารเจือในฟิล์มซิลิคอนดอทเป็นปัจจัยสำหรับการแพร่ รวมถึงความสามารถในการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสในฟิล์มซิลิคอนดอทไปยังชั้น n-Si เพื่อให้เกิดบริเวณความหนาแน่นของสารเจือฟอสฟอรัสมากขึ้น (n^{++} Si region) เป็นสิ่งสำคัญที่จำเป็นต้องพิจารณา

ดังนั้นในการศึกษานี้ได้ปรับเปลี่ยนปริมาณสารละลาย TEOS sol-gel ที่มีส่วนประกอบของ TEOS:EtOH: H_3PO_4 (7:2.1:1) ในหมึก Si dots ที่มีส่วนประกอบของ TP:EC:ผงซิลิคอน:TEOS sol-gel โดยให้ปริมาณของ TP, EC และผงซิลิคอนคงที่ มีอัตราส่วนเป็น 1:0.22:0.28:TEOS sol-gel และสัดส่วนของ TEOS sol-gel ปรับเปลี่ยนสัดส่วนตั้งแต่ 0, 0.33, 0.67 และ 1.00 หลังกระบวนการผลิตฟิล์มจะได้ฟิล์มซิลิคอนดอทที่มีส่วนประกอบของฟอสฟอรัสซิลิเกตต่างกัน การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของ Si, O และ P ในฟิล์มซิลิคอนดอทสามารถวัดได้ด้วยเทคนิค Energy dispersive X-ray (EDX) ในระบบการวัดด้วย SEM รุ่น JEOL6010LV



รูปที่ 3.8 ฟิล์มซิลิคอนดอทบนโครงสร้างเซลล์อาทิตย์ชนิดซิลิคอน

ในการศึกษาขั้นแรกได้พิจารณาชั้น n-Si ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีซิลิคอนจากบริษัทโซลาร์ตรอน เพื่อศึกษาปริมาณของ P ที่เป็นสารเจือในชั้น n ซึ่งมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่น (Sheet resistance) ประมาณ 95 Ω /sheet ผลการวัดวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธี EDX จากเครื่อง SEM JEOL รุ่น j6010LV ปริมาณธาตุในฟิล์มซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ซิลิคอนไดออกไซด์และภาพถ่ายตัดขวางจาก SEM แสดงดังรูปที่ 3.10 (ก)-(จ) ผลการเปรียบเทียบปริมาณธาตุของฟิล์มซิลิคอนดอทและชั้น n ของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในตารางที่ 3.2 จากผลพบว่าชิ้นงานที่ไม่มีส่วนผสมของ TEOS sol-gel นั้นไม่พบปริมาณธาตุฟอสฟอรัส (P) และเมื่อมีปริมาณเพิ่มขึ้นในสัดส่วน 0.33 เครื่องไม่สามารถตรวจจับได้ เนื่องจากรุ่น j6010LV ไม่มีส่วนของชุดตรวจจับชนิด WDS (Wavelength dispersive spectroscopy) อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเพิ่มปริมาณ TEOS sol-gel มีสัดส่วนเป็น 0.67 และ 1 พบว่าปริมาณ P ที่ตรวจจับได้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.47 %wt. และ 1.10 %wt. ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ TEOS sol-gel ที่มีกรด H_2PO_4 สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชั้น n-Si ของเซลล์แสงอาทิตย์มีส่วนของอะตอมสารเจือ P ปริมาณ 0.13 %wt. ซึ่งน้อยกว่า จากผลแสดงให้เห็นว่าหมึก Si dots ที่เตรียมได้นั้นสามารถนำไปผลิตฟิล์มซิลิคอนดอทเพื่อเป็นแหล่งเจือในบริเวณเฉพาะที่ต้องการได้ และสามารถควบคุมปริมาณสารเจือในฟิล์มจากการให้สัดส่วนของ TEOS sol-gel ในสารละลายหมึกเพิ่มขึ้นได้

Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 3

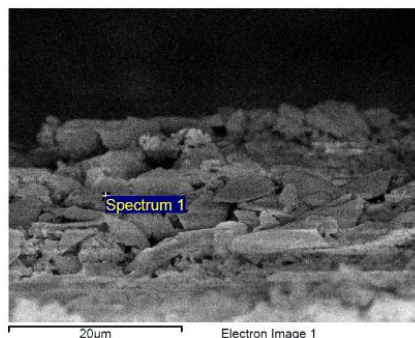
Standard :

B B 20-Jul-1999 12:00 AM
C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
P GaP 1-Jun-1999 12:00 AM
Au Au 1-Jun-1999 12:00 AM

Elem... Weight% Atomic%

| | | |
|------|-------|-------|
| B K | 13.17 | 24.43 |
| C K | 31.88 | 53.26 |
| O K | 2.71 | 3.40 |
| Si K | 22.18 | 15.85 |
| P K | 0.00 | 0.00 |
| Au M | 30.06 | 3.06 |

Totals 100.00



(ก) ปริมาณธาตุในฟิล์มซิลิคอนดอทที่เจือ TEOS sol-gel ที่สัดส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 0

Spectrum processing :
Peak possibly omitted : 3.700 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 3

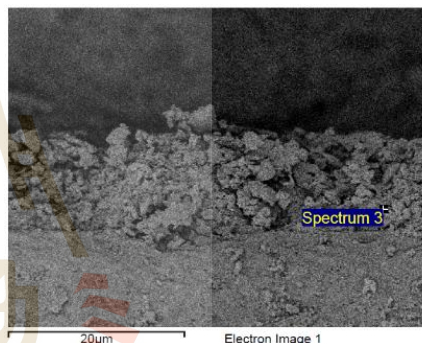
Standard :

B B 20-Jul-1999 12:00 AM
C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
P GaP 1-Jun-1999 12:00 AM
Au Au 1-Jun-1999 12:00 AM

Elem... Weight% Atomic%

| | | |
|------|-------|-------|
| B K | 11.83 | 24.00 |
| C K | 15.86 | 28.95 |
| O K | 13.67 | 18.73 |
| Si K | 32.57 | 25.42 |
| P K | 0.00 | 0.00 |
| Au M | 26.07 | 2.90 |

Totals 100.00



(ข) ปริมาณธาตุในฟิล์มซิลิคอนดอทที่เจือ TEOS sol-gel ที่สัดส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 0.33

Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 3

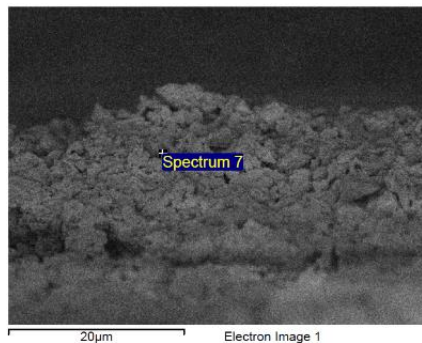
Standard :

B B 20-Jul-1999 12:00 AM
C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
P GaP 1-Jun-1999 12:00 AM
Au Au 1-Jun-1999 12:00 AM

Elem... Weight% Atomic%

| | | |
|------|-------|-------|
| B K | 16.34 | 29.98 |
| C K | 18.38 | 30.36 |
| O K | 10.06 | 12.48 |
| Si K | 35.29 | 24.92 |
| P K | 0.47 | 0.30 |
| Au M | 19.46 | 1.96 |

Totals 100.00



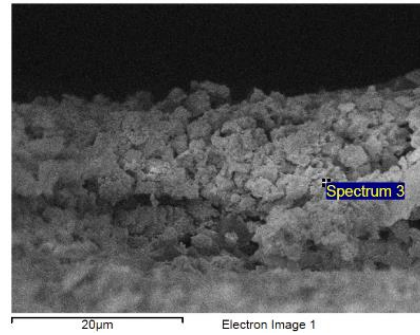
(ค) ปริมาณธาตุในฟิล์มซิลิคอนดอทที่เจือ TEOS sol-gel ที่สัดส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 0.67

Spectrum processing :
Peak possibly omitted : 0.850 keV
Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 3

Standard :
B B 20-Jul-1999 12:00 AM
C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
P GaP 1-Jun-1999 12:00 AM
Au Au 1-Jun-1999 12:00 AM

| Elem... | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| B K | 12.83 | 23.48 |
| C K | 14.94 | 24.62 |
| O K | 14.62 | 18.09 |
| Si K | 45.41 | 32.00 |
| P K | 1.10 | 0.70 |
| Au M | 11.10 | 1.11 |

Totals 100.00



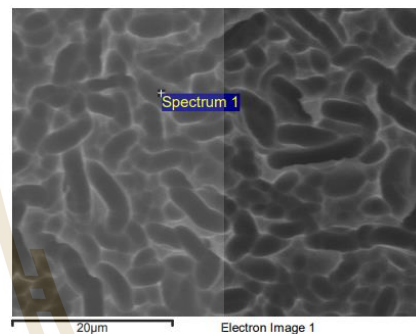
(ง) ปริมาณธาตุในฟิล์มซิลิคอนดอทที่เงื่อนไข TEOS sol-gel ที่สัดส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 0.67

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 3

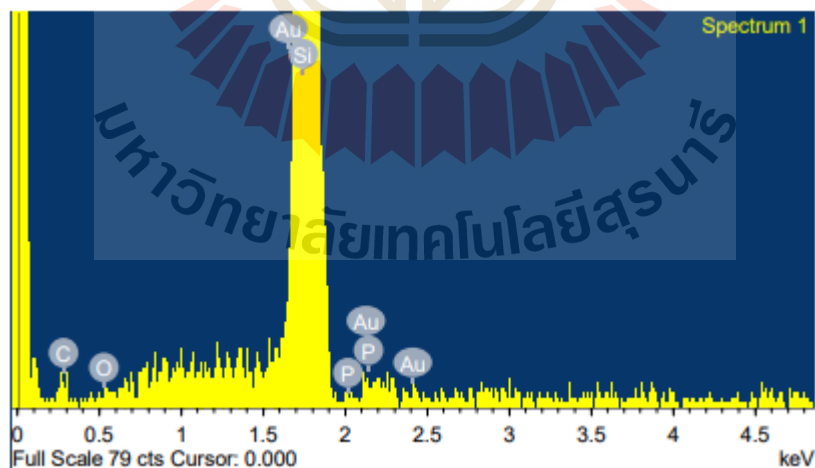
Standard :
C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
P GaP 1-Jun-1999 12:00 AM
Au Au 1-Jun-1999 12:00 AM

| Elem... | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K | 8.40 | 17.82 |
| O K | 0.47 | 0.75 |
| Si K | 89.37 | 81.11 |
| P K | 0.13 | 0.11 |
| Au M | 1.63 | 0.21 |

Totals 100.00



(จ) ปริมาณธาตุในชั้น n-Si ของเซลล์แสงอาทิตย์จากบริษัทโซลาร์ตรอนจำกัด (มหาชน)



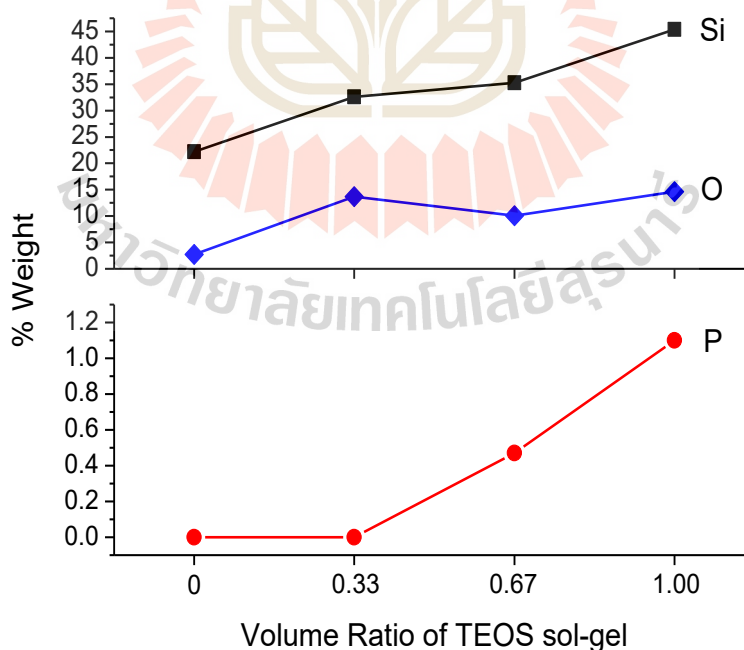
(ฉ) สเปกตรัม EDX ของการวิเคราะห์ธาตุในชั้น n-Si ของเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 3.9 (ก)-(จ) ภาพถ่าย FESEM และ EDX ปริมาณอะตอมที่พบในฟิล์มในเงื่อนไข TEOS sol-gel ที่สัดส่วน 0 0.33 0.67 และ 1.00 เปรียบเทียบกับในชั้น n-Si ของเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 3.2 ปริมาณอะตอมของธาตุที่วิเคราะห์จาก EDX ในฟิล์ม Si dot เปรียบเทียบกับในชั้น n-Si ของเซลล์แสงอาทิตย์

| ธาตุ | Si dots films with volume ratio of TP : EC : Si powder : TEOS sol-gel | | | | | | | | n-Si layer | |
|------|---|-------|------------------|-------|------------------|-------|---------------|-------|------------|-------|
| | 1:0.22:0.32:0 | | 1:0.22:0.32:0.33 | | 1:0.22:0.32:0.67 | | 1:0.22:0.32:1 | | %wt. | %at. |
| | %wt. | %at. | %wt. | %at. | %wt. | %at. | %wt. | %at. | | |
| B | 13.17 | 24.43 | 11.83 | 24.00 | 16.34 | 29.98 | 12.83 | 23.48 | - | - |
| C | 31.88 | 53.26 | 15.86 | 28.95 | 18.38 | 30.36 | 14.94 | 24.62 | 8.4 | 17.82 |
| O | 2.71 | 3.04 | 13.67 | 18.73 | 10.06 | 12.48 | 14.62 | 18.09 | 0.47 | 0.75 |
| Si | 22.18 | 15.85 | 32.57 | 25.42 | 35.29 | 24.92 | 45.41 | 32.00 | 89.37 | 81.11 |
| P | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.47 | 0.30 | 1.10 | 0.70 | 0.13 | 0.11 |
| Au | 30.06 | 3.06 | 26.07 | 2.90 | 19.46 | 1.96 | 11.10 | 1.11 | 1.63 | 0.21 |

ขณะเดียวกันไม่เพียงแต่ปริมาณ P ที่เพิ่มขึ้น Si และ O มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของ TEOS sol-gel ที่มีสาร $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ มากขึ้นด้วยเช่นกัน แสดงความสัมพันธ์ดังกราฟรูปที่ 3.10 ดังนั้นการศึกษาฟิล์มบาง Si dots ซึ่งใช้หมึก Si dots สามารถแสดงให้เห็นว่าฟิล์มสามารถปรับเปลี่ยนสัดส่วนของสารเจือ P ได้จากการเพิ่มสัดส่วนของ TEOS sol-gel



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ของปริมาณอะตอม %Weight ของฟอสฟอรัส ออกซิเจน และซิลิคอน ในฟิล์มซิลิคอนดอทในเงื่อนไขของปริมาณสัดส่วน TEOS sol-gel

3.4.5 การแพร่ของอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสในฟิล์มซิลิคอนดอทในเมตริกซ้ออกไซด์

หลังจากมีการศึกษาผลของปริมาณอะตอมสารเจือ P ให้กับฟิล์ม Si dots ด้วยวิธีเพิ่มสัดส่วนของสารละลาย TEOS sol-gel ในหมึก Si dots แล้ว ในส่วนนี้ได้จะแสดงผลการศึกษาอนุกรมการอบฟิล์มซิลิคอนดอทที่มีต่อการแพร่ แหล่งสารเจือในลักษณะฟิล์มซิลิคอนดอทที่มีความแตกต่างจากแหล่งสารเจือของแข็งทั่วไป ซึ่งวางให้มีระยะห่างให้อะตอมจะแพร่จากของแข็งผ่านตัวกลางอากาศไปยังแผ่นฐานซิลิคอน แต่ฟิล์มซิลิคอนดอทนั้นเคลือบบนแผ่นฐาน ทำให้ไม่สามารถวัดปริมาณสารเจือที่แพร่ในบริเวณแผ่นฐานได้โดยตรง หรือวัดค่าความต้านทานแผ่นในบริเวณแพร่ซึมสารเจือดังกล่าวได้ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงศึกษาการแพร่อะตอม P จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในฟิล์มซิลิคอนดอทที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยวิธี EDX จากเครื่อง Field emission scanning electron spectroscopy (FESEM) รุ่น JSM7800F ที่มีความละเอียดสูงและมีส่วนของชุดตรวจจับชนิด WDS ทำให้สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อยได้ เงื่อนไขของฟิล์มซิลิคอนดอทอนุกรมที่อบฟิล์มมีค่าตั้งแต่ 100°C 500°C 600°C และ 700°C จากการใช้หมึก Si dots ในสัดส่วนของสารละลายโดยปริมาตรเท่ากับ 1:0.22:0.28:0.33 และเคลือบบนแผ่นควอทซ์

รูปที่ 3.11 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุ Si O และ P ด้วยการวัดของ EDX ของ FSEM (JSM7800F) จากผลภาพถ่ายด้านบนฟิล์มพบว่าฟิล์มที่อบอุณหภูมิ 100°C มีลักษณะขรุขระจากผิวเม็ดทรงกลมเล็กๆ และปริมาณของอะตอม P ที่อุณหภูมิต่ำ (100°C) ตรวจจับได้เท่ากับ 5.78 %at. เมื่ออบฟิล์มที่อุณหภูมิสูงขึ้น พบลักษณะของผิวฟิล์มขรุระลดลง เรียบขึ้นไม่พบผิวเม็ดทรงกลมเล็ก ๆ ปริมาณอะตอม P ลดลงมากอย่างเห็นได้ชัดจาก 5.78 %at. เป็น 0.18 %at. แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการแพร่ P จากฟิล์มซิลิคอนดอทได้ดีแม้ที่อุณหภูมิ 500 °C สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ของปริมาณธาตุ (%at.) ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิการอบฟิล์ม แสดงในรูปที่ 3.12

Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 2

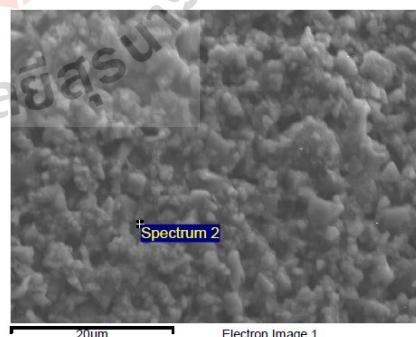
Standard :

O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
P GaP 1-Jun-1999 12:00 AM

Elem... Weight% Atomic%

| | | |
|------|-------|-------|
| O K | 31.06 | 44.42 |
| Si K | 61.12 | 49.80 |
| P K | 7.82 | 5.78 |

Totals 100.00



(ก) ปริมาณธาตุในฟิล์มซิลิคอนดอทที่ผ่านการอบความร้อนที่ 100°C

Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 2

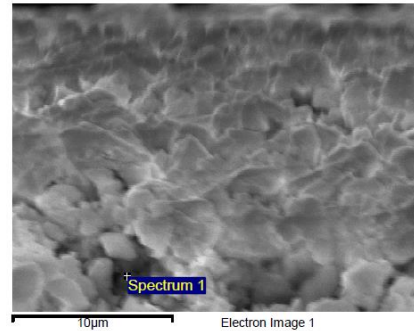
Standard :

O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
P GaP 1-Jun-1999 12:00 AM

Elem... Weight% Atomic%

| | | |
|------|-------|-------|
| O K | 10.76 | 17.48 |
| Si K | 88.28 | 81.71 |
| P K | 0.96 | 0.80 |

Totals 100.00



(ข) ปริมาณธาตุในฟิล์มซิลิคอนดอทที่ผ่านการอบความร้อนที่ 500°C

Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 2

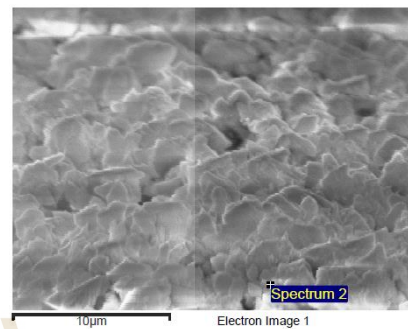
Standard :

O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
P GaP 1-Jun-1999 12:00 AM

Elem... Weight% Atomic%

| | | |
|------|-------|-------|
| O K | 17.74 | 27.49 |
| Si K | 81.28 | 71.73 |
| P K | 0.98 | 0.78 |

Totals 100.00



(ค) ปริมาณธาตุในฟิล์มซิลิคอนดอทที่ผ่านการอบความร้อนที่ 600°C

Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 2

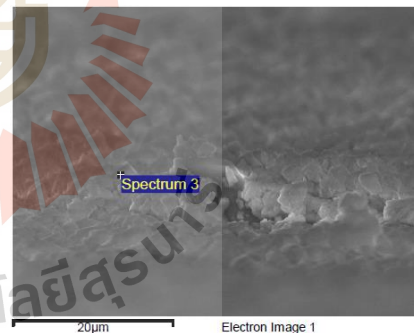
Standard :

O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
P GaP 1-Jun-1999 12:00 AM

Elem... Weight% Atomic%

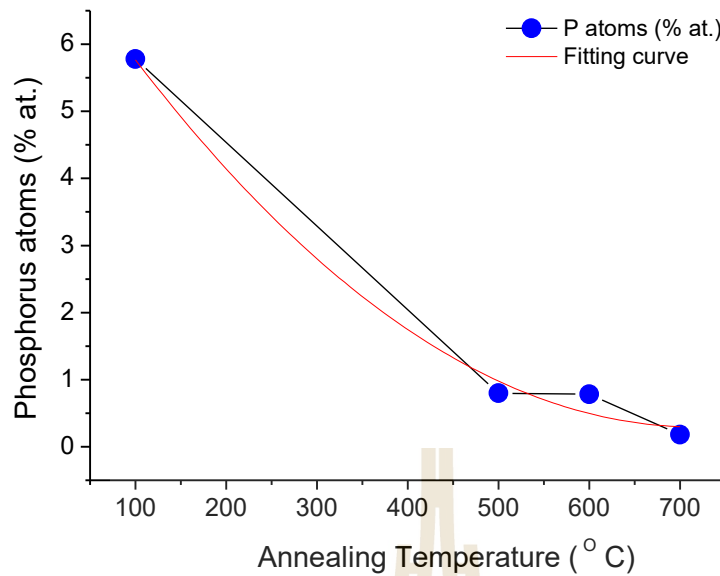
| | | |
|------|-------|-------|
| O K | 23.84 | 35.47 |
| Si K | 75.92 | 64.34 |
| P K | 0.24 | 0.18 |

Totals 100.00



(ง) ปริมาณธาตุในฟิล์มซิลิคอนดอทที่ผ่านการอบความร้อนที่ 700°C

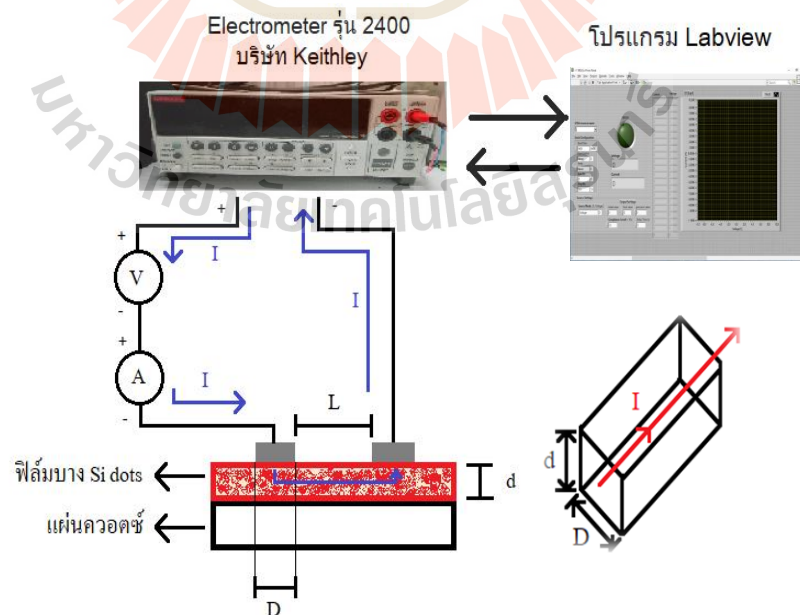
รูปที่ 3.11 (ก)-(ง) ภาพถ่าย FESEM และ EDX ของปริมาณอะตอมที่พบในฟิล์มซิลิคอนดอทในเงื่อนไขอุณหภูมิการอบที่ 100 °C ถึง 700°C



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ของปริมาณธาตุ (%wt.) ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิการอบฟิล์ม

3.4.6 สมบัติทางไฟฟ้าภายใต้แสงของฟิล์มซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ออกไซด์

การศึกษานี้ได้ทำการวัดกระแสไฟฟ้าขณะป้อนแรงดันไฟฟ้าของฟิล์มบาง Si dots ด้วยการใช้อุปกรณ์ Electrometer รุ่น 2400 จากบริษัท Keithley ฟิล์มมีขั้วโลหะจาก Silver paste เพื่อเป็นขั้วอิเล็กโทรดรวบรวมกระแสไฟฟ้า การวัดค่า J-V แบบออตโนมัตินี้ด้วยระบบคำสั่งจากโปรแกรม Labview โดยพิจารณาป้อนแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -10V ถึง 10V ซึ่งมีแผนภาพประกอบแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แผนภาพของระบบการวัด J-V ของฟิล์ม Si dots

ในการคำนวณการหาค่าทางไฟฟ้ามีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

1.) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J (A/cm^2)

$$J = \frac{I}{A} = \frac{I}{D \times d} \quad (3.7)$$

โดยที่ I คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรดผ่านชั้นฟิล์มบาง [A]

A คือพื้นที่หน้าตัดที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน [cm^2]

D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วอิเล็กโทรด [cm]

d คือความหนาของฟิล์มบาง [cm]

2.) ค่าความต้านทานไฟฟ้า R (Ω)

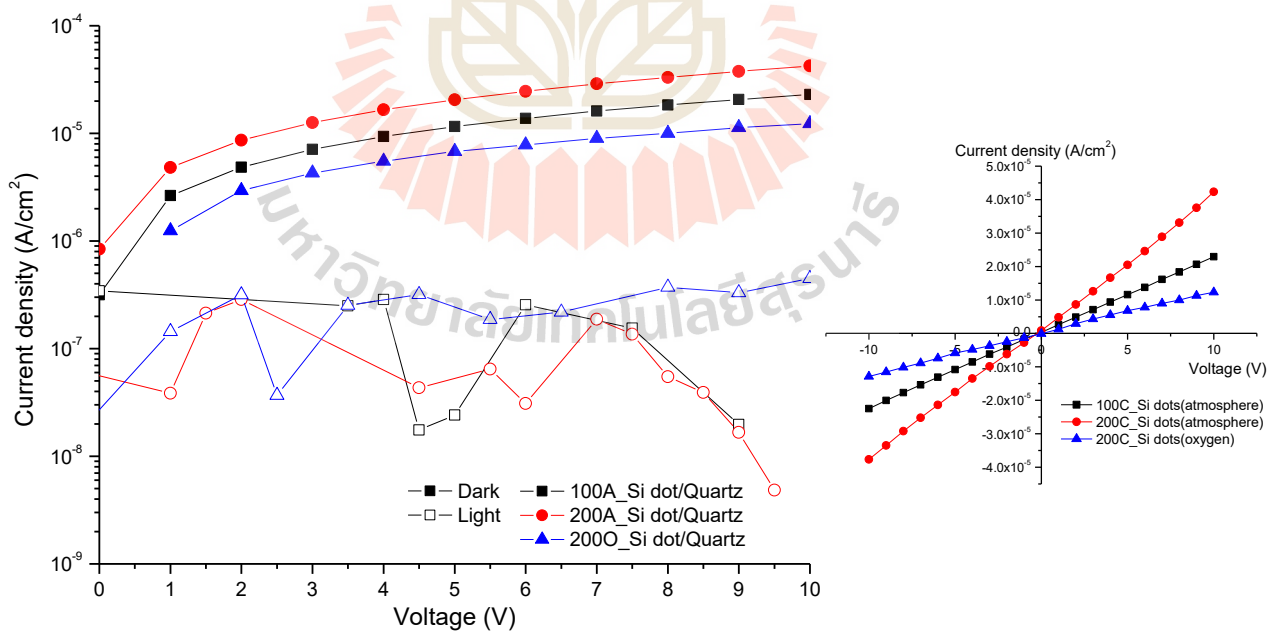
$$R = \frac{V}{I} = \frac{1}{slope} \quad (3.8)$$

โดยที่ V คือแรงดันไฟฟ้า [V] และ $slope$ คือความชันของกราฟ I-V [A/V]

3.) ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ρ ($\Omega \text{ cm}$)

$$\rho = \frac{R \times A}{L} \quad (3.9)$$

โดยที่ L คือระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (cm)



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของฟิล์มบาง Si dots
เข้มชั้นสูงในเมตริกซ์ออกไซด์

การทดสอบเลือกใช้ฟิล์มที่มีปริมาณ %at Phosphorus ในระดับสูงจากชิ้นงานที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100°C และ 200°C ภายใต้บรรยากาศปกติและออกซิเจน เพื่อวัดผลทางไฟฟ้าภายใต้สภาวะมืดและสว่าง แสดงผล J-V curve ในรูปที่ 3.14 ส่วนฟิล์มบางอบที่อุณหภูมิที่สูง ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าน้อยเกินไป มีค่าความนำทางไฟฟ้าต่ำเนื่องจาก %at Phosphorus ในฟิล์มมีน้อยมาก จากรูปพบว่าฟิล์มทั้ง 3 เจือปนให้สมบัติขั้วไฟฟ้า Ag/Si dots แบบ Ohmic contact และมีค่านำไฟฟ้าไม่แตกต่างกันมาก อยู่ในช่วง 1 – 10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ และเมื่อทำการวัดในที่สว่างพบว่าค่า J ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เกิดผลการเสื่อมลงของกระแสไฟฟ้าเมื่อได้รับแสง (Light induced degradation, LID) แสดงให้เห็นว่าฟิล์ม Si dots หนาแน่นสูง ไม่เหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นชั้นรับแสงเพื่อผลิต free charge carrier แต่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มฐานรอง หรือเป็นแหล่งสารเจือเพื่อแพร่สารในบางบริเวณที่ต้องการได้เช่น บริเวณด้านหน้าสำหรับผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Selective emitter

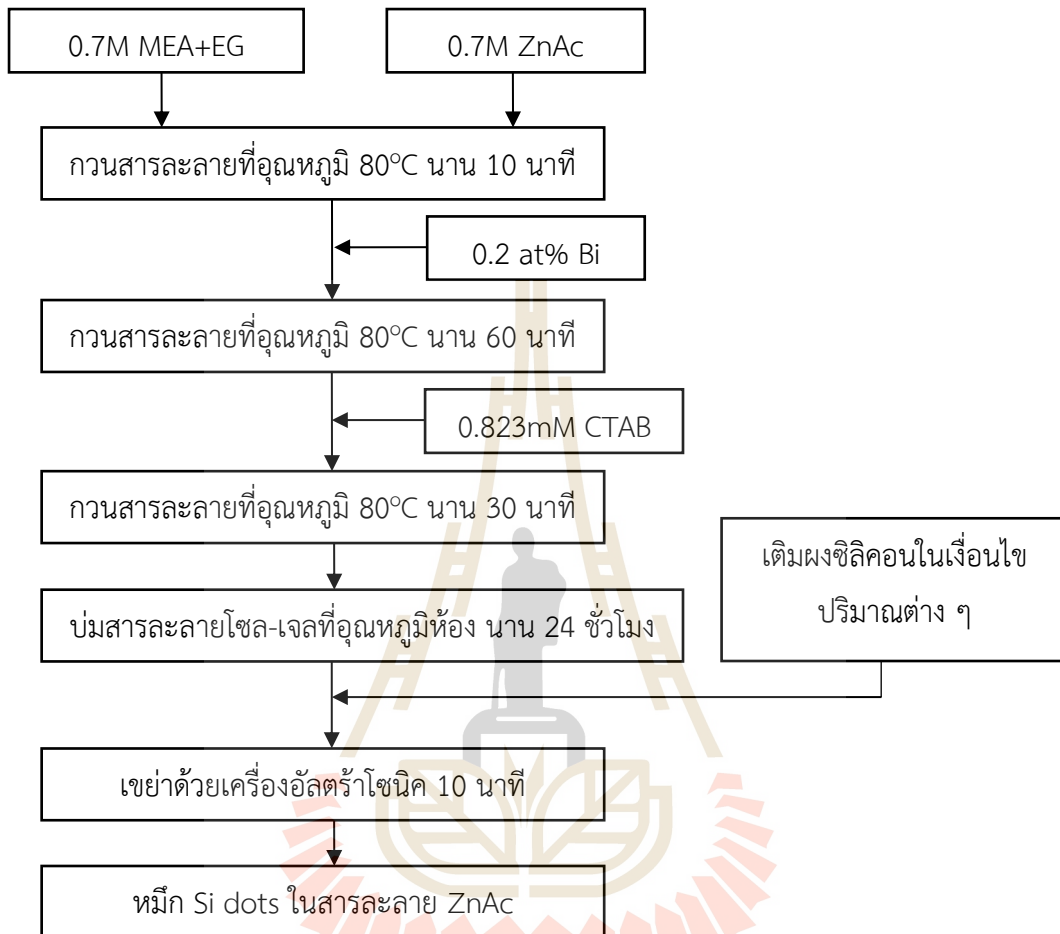
3.5 หมึกซิลิคอนดอทสำหรับการผลิตฟิล์มบางซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ ZnO:Bi

จากการเตรียมหมึกซิลิคอนดอทที่มีส่วนผสมของผงซิลิคอนจำนวนมาก และสารผสมของสารอินทรีย์ของ TP และ EC ทำให้ได้ฟิล์ม Si dots หนาแน่นสูง ให้สมบัติการแพร่ที่ดี อย่างไรก็ตามจะเกิดผลเสียจาก LID ที่ทำให้ค่า J ลดลงภายใต้แสงที่ตกกระทบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาฟิล์ม Si dots เพื่อนำไปใช้เป็นชั้นรับแสง จึงมีการเตรียมหมึกซิลิคอนดอทชนิดใหม่ ให้มีความหนาแน่นของผงซิลิคอนที่น้อย และไม่มีส่วนประกอบของ TP และ EC เพื่อให้ฟิล์มมีความโปร่งแสงมากขึ้น และใช้ตัวกลางเมตริกซ์เป็นกลุ่มสาร Photocatalyst ของ ZnO

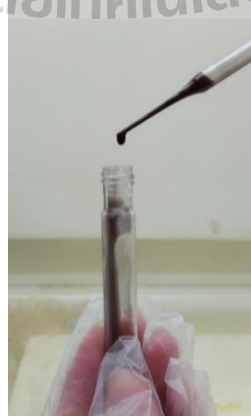
รูปที่ 3.15 แสดงแผนภาพการเตรียมหมึก Si dots ที่มีส่วนผสมของ Zinc acetate dehydrate (ZnAc) หมึก Si dots มีความหนืดน้อย แสดงภาพของหมึกที่ผลิตได้ในรูปที่ 3.16 ฟิล์มบาง 1 ชั้นที่ผลิตได้สามารถเคลือบบนแผ่นฐานด้วยวิธีการเคลือบแบบการหมุนเหวี่ยง (Spin coating) ได้ และแสงสามารถทะลุผ่านฟิล์มบางได้ ฟิล์มบาง Si dots พิจารณาเงื่อนไขของปริมาณผงซิลิคอนที่เติมลงในสารละลายของ ZnAc และอบฟิล์มที่อุณหภูมิในเงื่อนไขตั้งแต่ 200°C – 550°C นาน 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ของ ZnO:Bi

รูปที่ 3.17 (ก) – (ง) แสดงภาพถ่ายกำลังขยาย 2K ถึง 100K เท่า ของผิวฟิล์ม ZnO:Bi และฟิล์ม Si dots ในเงื่อนไขปริมาณผงซิลิคอน 0.03g 0.10g และ 0.15g ตามลำดับ และผ่านการอบฟิล์มที่ 550°C นาน 1 ชั่วโมง ด้วยเครื่อง Field emission scanning electron spectroscopy (FESEM) รุ่น JSM7800F จากผลการวัดพบว่าฟิล์ม ZnO:Bi 1 ชั้นมีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมขนาดเล็กกระจายทั่วแผ่น กรณีที่ต้องการความสม่ำเสมอของฟิล์ม จำเป็นต้องเคลือบฟิล์ม ZnO:Bi มากกว่า 1 ชั้น เมื่อมีการเติมผง Si เราสามารถพบอนุภาค Si ที่มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาค ZnO:Bi และพบปริมาณอนุภาค Si หนาแน่นมากขึ้นตามปริมาณผง Si ที่มีในหมึกมากขึ้น อีกทั้งยังพบอนุภาค ZnO:Bi ทรงกลมขนาดเล็กเกาะที่ผิวของอนุภาค Si แสดงในรูปที่ 13.17 (ง)

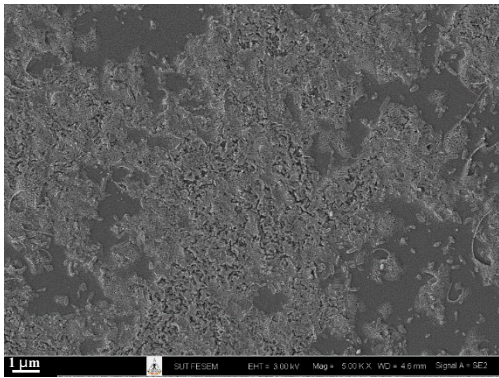
นอกเหนือจากพื้นที่ผิวที่มีผลต่อ Photoactivity โครงสร้างของผลึก ZnO ในแบบทรงกลมหรือครึ่งวงกลมที่ผิวฟิล์มจะสามารถให้ประสิทธิภาพของ Photocatalytic ได้ดีกว่าโครงสร้างรูปอื่นเช่นแบบแท่งและแบบวงแหวน (R. Boppella, *J. Phys. Chem. C* 2013, 117, 4597–4605)



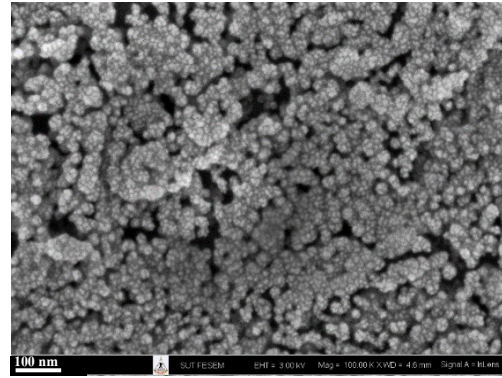
รูปที่ 3.15 แผนภาพขั้นตอนการผลิตหมึก Si dots ในสารละลาย ZnAc



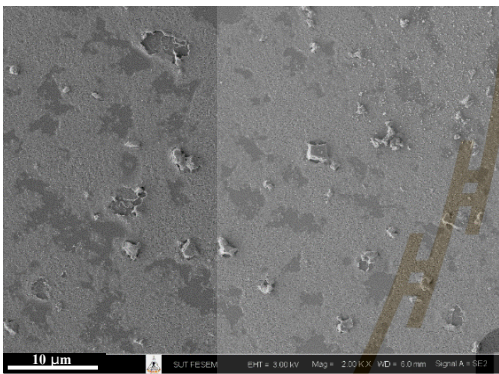
รูปที่ 3.16 หมึก Si dots ในสารละลาย ZnAc



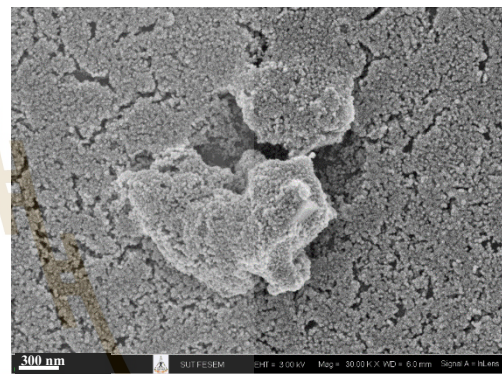
(ก) ZnO:Bi film 5K เท่า



(ข) ZnO:Bi film 100K เท่า



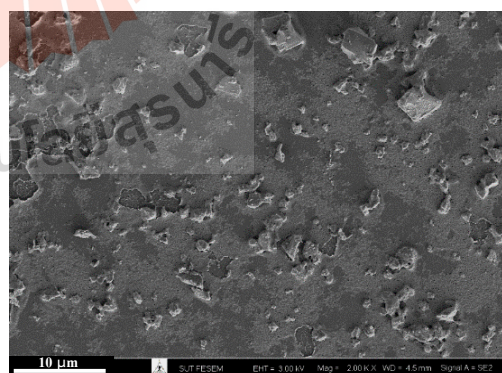
(ค) 0.03g_Si dots 2K เท่า



(ง) 0.03g_Si dots 30K เท่า



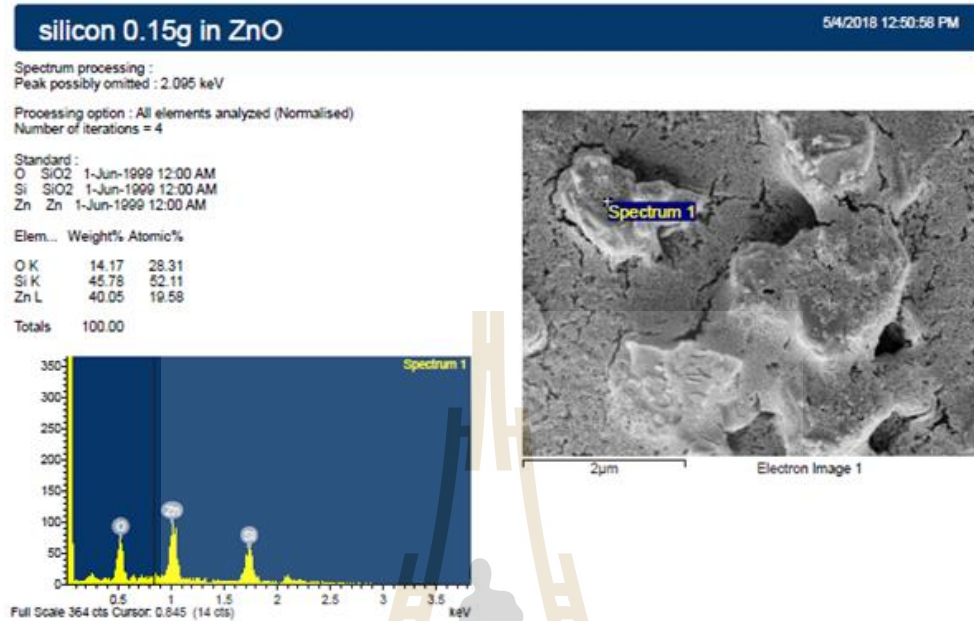
(จ) 0.10g_Si dots 2K เท่า



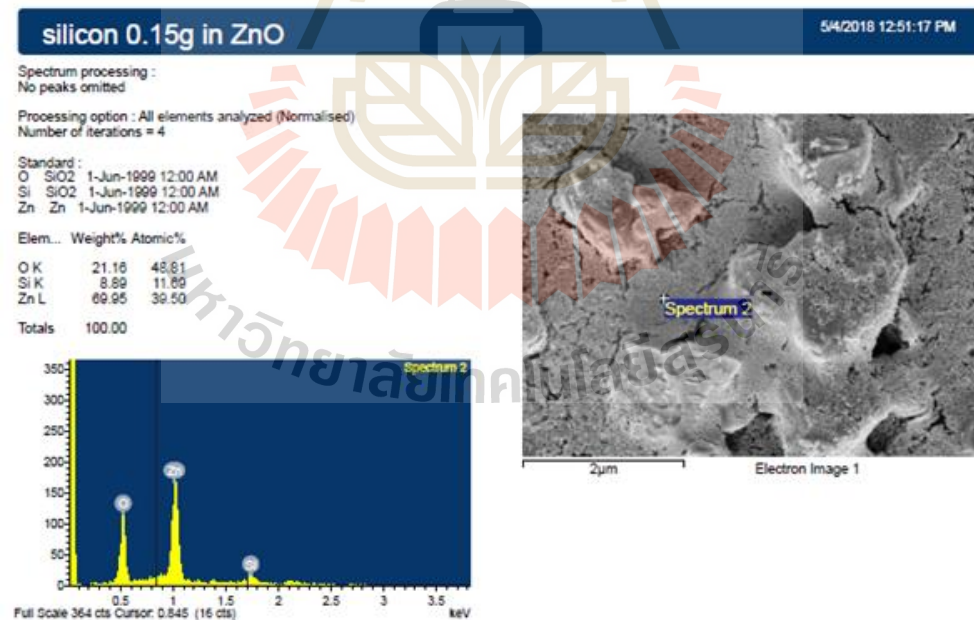
(ฉ) 0.15g_Si dots 2K เท่า

รูปที่ 3.17 ภาพถ่าย FSEM กำลังขยาย 10^5 เท่า (ด้านขวา) ของ (ก) फिल्म ZnO และฟิล์ม Si dots ในเงื่อนไขปริมาณผงซิลิคอนในหมึก (ข) 0.03g (ค) 0.10g และ (ง) 0.15g

รูปที่ 3.18 (ก) และ (ข) แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุ Si O และ Zn ด้วยการวัดของ EDX ของ FSEM (JSM7800F) ที่บริเวณอนุภาคผลึก Si และบริเวณล้อมรอบ ตามลำดับ จากผล EDX พบว่าที่บริเวณอนุภาคผลึก Si มีปริมาณของ Zn อยู่ที่ 19.58 at% และมีปริมาณสูงขึ้นไปบริเวณล้อมรอบที่ 39.50 %at



(ก) ปริมาณธาตุในฟิล์ม Si dots ที่บริเวณอนุภาคผลึก Si

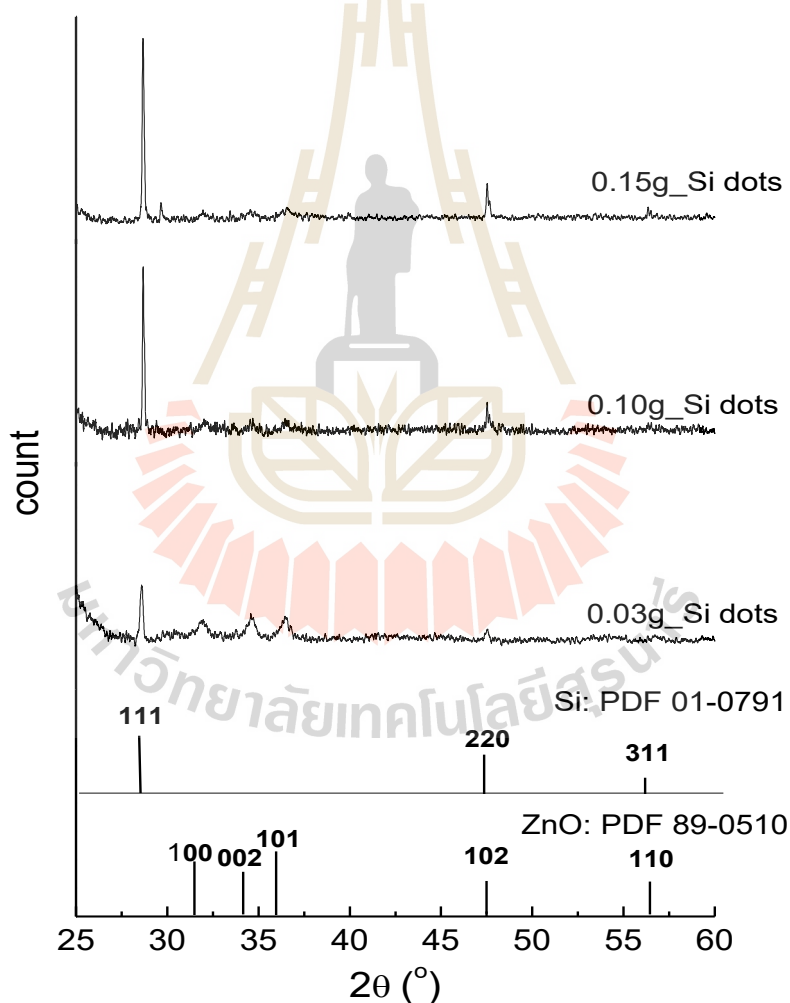


(ข) ปริมาณธาตุในฟิล์ม Si dots ที่บริเวณล้อมรอบอนุภาคผลึก Si

รูปที่ 3.18 ผลการวิเคราะห์ธาตุ Si O และ Zn (ก) ที่บริเวณอนุภาคผลึก Si และ (ข) บริเวณล้อมรอบตามลำดับ

3.5.1 การวัดคุณภาพผลึกของฟิล์ม Si dots ด้วยเทคนิค X-ray diffraction

ในหัวข้อ 3.3.2 ได้ศึกษาวัดคุณภาพผลึกของผงซิลิคอนด้วยเทคนิค X-ray diffraction หลังจากนำผง Si มาผสมกับสารละลาย ZnAc เพื่อให้ได้หมึก Si dots ในสัดส่วนความหนาแน่นของเม็ดผลึก Si ต่าง ๆ กัน เพื่อศึกษาคุณภาพของผลึก และคำนวณหาขนาดของเกรนผลึกด้วยสมการ Scherrer แสดงในสมการที่ (3.1) รูปที่ 3.19 แสดงสเปกตรัม XRD ของฟิล์ม Si dots เปรียบเทียบกับรูปแบบ XRD มาตรฐาน PDF 01-0791 ของผลึก Si และ PDF 89-0510 ของผลึก ZnO พบว่าฟิล์ม Si dots แสดงยอดสเปกตรัม XRD ที่ตำแหน่ง 2θ ของผลึก Si ที่ 28.44° และ 47.3° สำหรับระนาบผลึก (111) และ (220) ตามลำดับ ตำแหน่งทั้งสองบ่งบอกถึงคุณสมบัติความเป็นผลึกหลายรูปของซิลิคอน และมีความเด่นชัดที่ระนาบ (111) ของฟิล์ม Si dots ทุกเงื่อนไข และยังพบตำแหน่ง 2θ ของผลึก ZnO ที่ 31.75° 34.42° และ 36.23° ของระนาบ (100) (002) และ (101) ตามลำดับ บ่งบอกถึงคุณสมบัติความเป็นผลึกของซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 3.19 สเปกตรัม XRD ของฟิล์ม Si dots

ฟิล์ม 0.15g Si dots ประกอบด้วยอนุภาคผลึกหลายรูปของ Si ที่ประกอบด้วยขนาดเกรนผลึกระนาบ (111) (220) และ (311) เท่ากับ 66.71 nm 52.33 nm และ 57.08 nm ตามลำดับ แต่เมื่อฟิล์ม Si

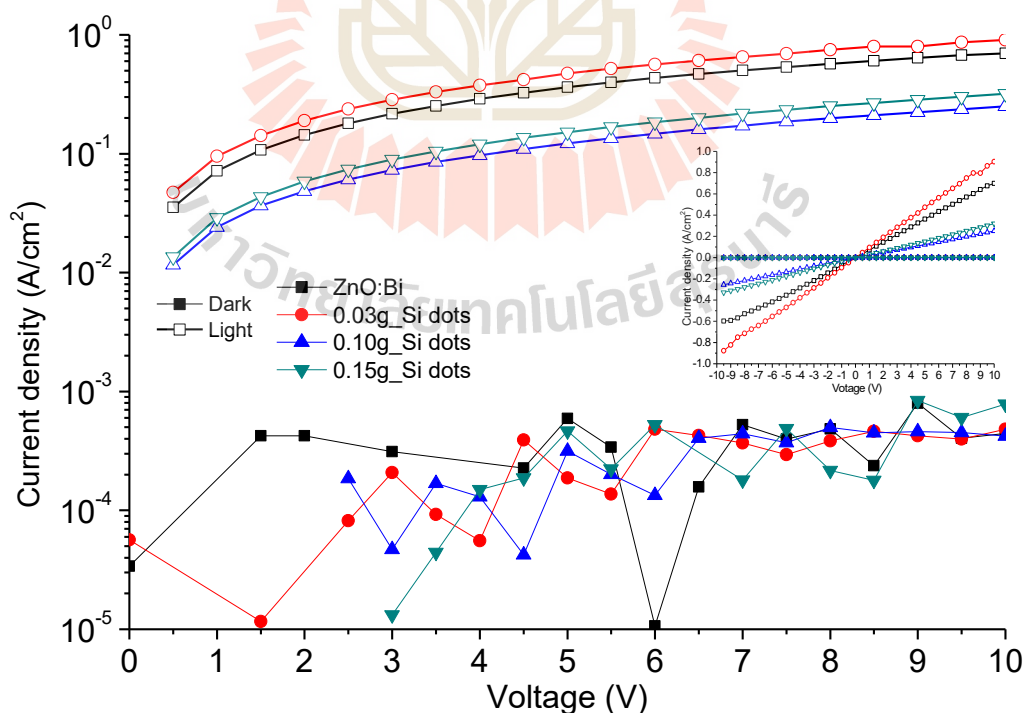
dots หนาแน่นลดลง ไม่พบผลึกที่ระนาบ (311) ขนาดผลึกคำนวณจากสมการ Sherrer แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ขนาดของผลึก Si dots และผลึก ZnO:Bi ในฟิล์ม Si dots

| Samples | Crystallite size (nm) | | | | | |
|---------------|-----------------------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | Silicon | | | ZnO:Bi | | |
| | (111) | (220) | (311) | (100) | (002) | (101) |
| 0.03g_Si dots | 41.86 | 34.74 | - | 15.52 | 14.14 | 14.58 |
| 0.10g_Si dots | 64.62 | 59.50 | - | 17.56 | 14.02 | 10.44 |
| 0.15g_Si dots | 66.71 | 52.33 | 57.08 | 23.04 | 11.60 | 16.58 |

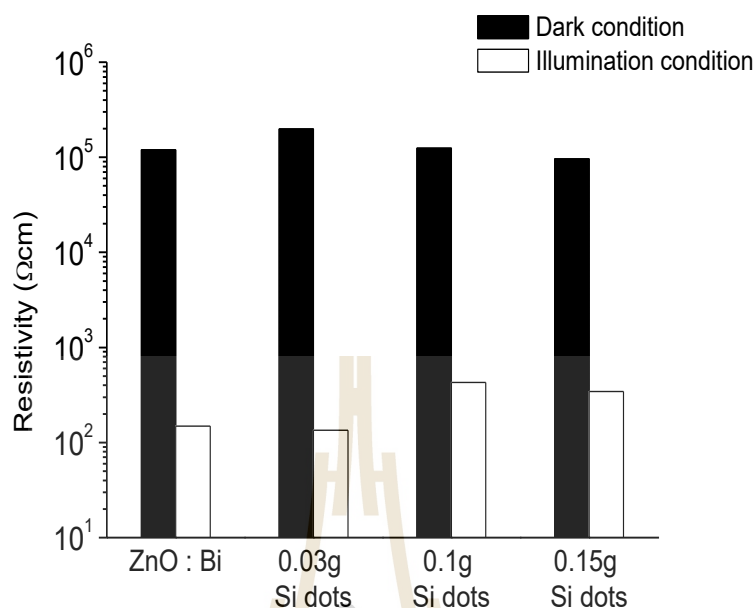
3.5.2 สมบัติทางไฟฟ้าภายใต้แสงของฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi

รูปที่ 3.20 แสดงความสัมพันธ์ J-V ของฟิล์ม Si dots ใน ZnO:Bi ในเงื่อนไขความหนาแน่นของปริมาณ Si จากกราฟพบว่าเกิดสมบัติ Ohmic contact ระหว่างขั้วไฟฟ้า Ag และฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi ให้กระแสโฟโต (Photocurrent) เนื่องจากล้อมรอบเม็ดผลึกทรงกลมของ ZnO:Bi ซึ่งมีคุณสมบัติ Photoactivity ที่ดี โดยที่ฟิล์ม 0.03_Si dots ให้ค่ากระแสโฟโตประมาณ 10^3 เท่าเมื่อเทียบกับกระแสสภาวะมืด และมีค่าสูงกว่าฟิล์ม ZnO:Bi ดังนั้นฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi จึงเหมาะสมสำหรับชั้นฟิล์มรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi

รูปที่ 3.21 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity) ของฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ (ZnO:Bi) พบว่าในสถานะแสงตกกระทบฟิล์มมีค่าลดลงอยู่ในระดับ $100 \Omega \cdot \text{cm}$.



รูปที่ 3.21 ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity) ของฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ (ZnO:Bi)

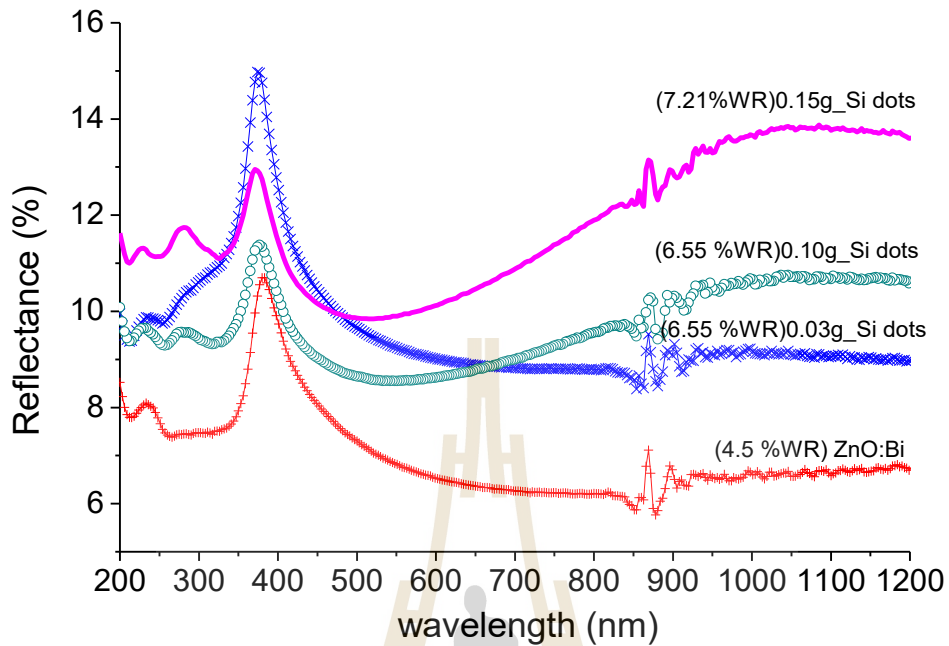
3.5.3 คุณสมบัติทางแสงของฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi

โดยทั่วไปฟิล์มบางสำหรับเป็นชั้นรับแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีคุณสมบัติทางแสงที่ดีเช่น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกลับที่ผิว (%R) มีค่าต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) มีค่าสูงในช่วงแสง Visible รวมถึงค่าคงที่ทางแสงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง

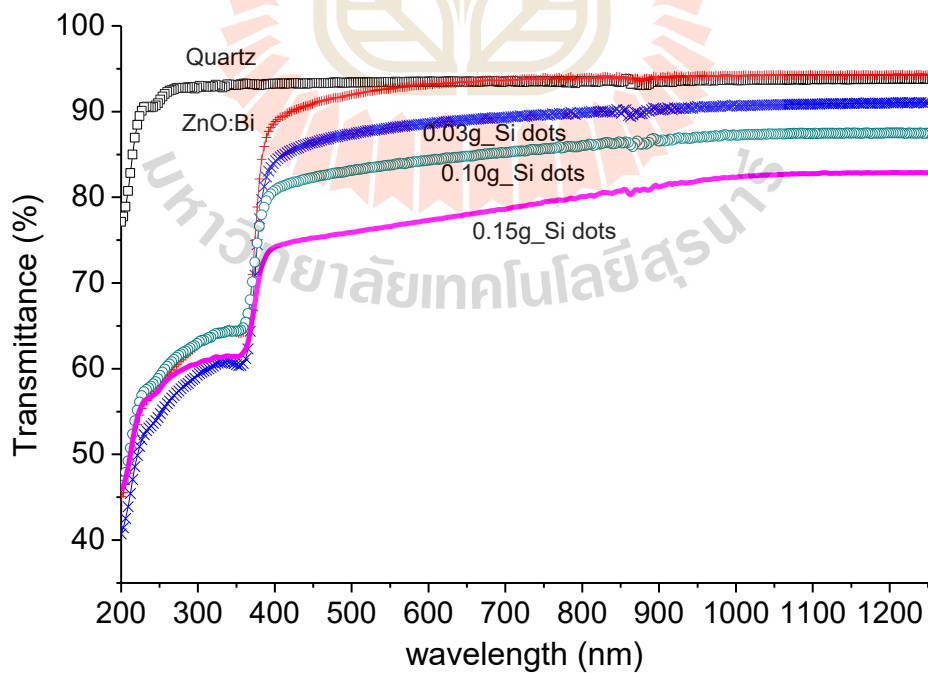
การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง Si dots ในเมตริกซ์ออกไซด์ใช้เครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer รุ่น LAMBDA 950 ของบริษัท PerkinElmer เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ผิวของแสง (Reflectance, %R) และสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง (Transmittance, %T) ที่ช่วงความยาวคลื่น 200 – 1250 nm ตกกระทบผิวของฟิล์มบาง ในโหมด Integrating sphere แบบ Specular included mode เพื่อนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง (Absorbance, α) ค่าแถบพลังงานช่องว่างของฟิล์มบาง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ค่าดัชนีหักเหของแสง และค่าไดอิเล็กตริก

รูปที่ 3.22 และ 3.23 แสดงสเปกตรัมการสะท้อนแสงกลับและการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางตามลำดับ ในช่วงความยาวคลื่น 200nm – 1250 nm โดยทั่วไป c-Si ฟิล์มชัดเรียบให้ค่า %Weight reflectance (%WR) สูงประมาณ 16.91% จากผลพบว่าสเปกตรัม %R ของฟิล์มบาง ZnO:Bi มีค่า %WR เท่ากับ 4.8% สำหรับฟิล์มบาง Si dots สำหรับปริมาณผง 0.03g 0.1g และ 0.015g ให้ %WR เท่ากับ 6.55% 6.15% และ 7.21% ตามลำดับ ซึ่งค่า %WR ที่มีค่าน้อยจะส่งผลดีสำหรับเป็นชั้นรับแสงบนเซลล์

แสงอาทิตย์ และอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ สเปกตรัม %T มีค่าลดลงตามความหนาแน่นของผงซิลิคอนที่เพิ่มขึ้น และในช่วงความยาวคลื่นแสงมากกว่า 380 nm จะมีค่า %T สูงกว่า 70%



รูปที่ 3.22 สเปกตรัมการสะท้อนแสงกลับที่ผิวของฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi ที่เจือไนไซปริมาณผงซิลิคอน



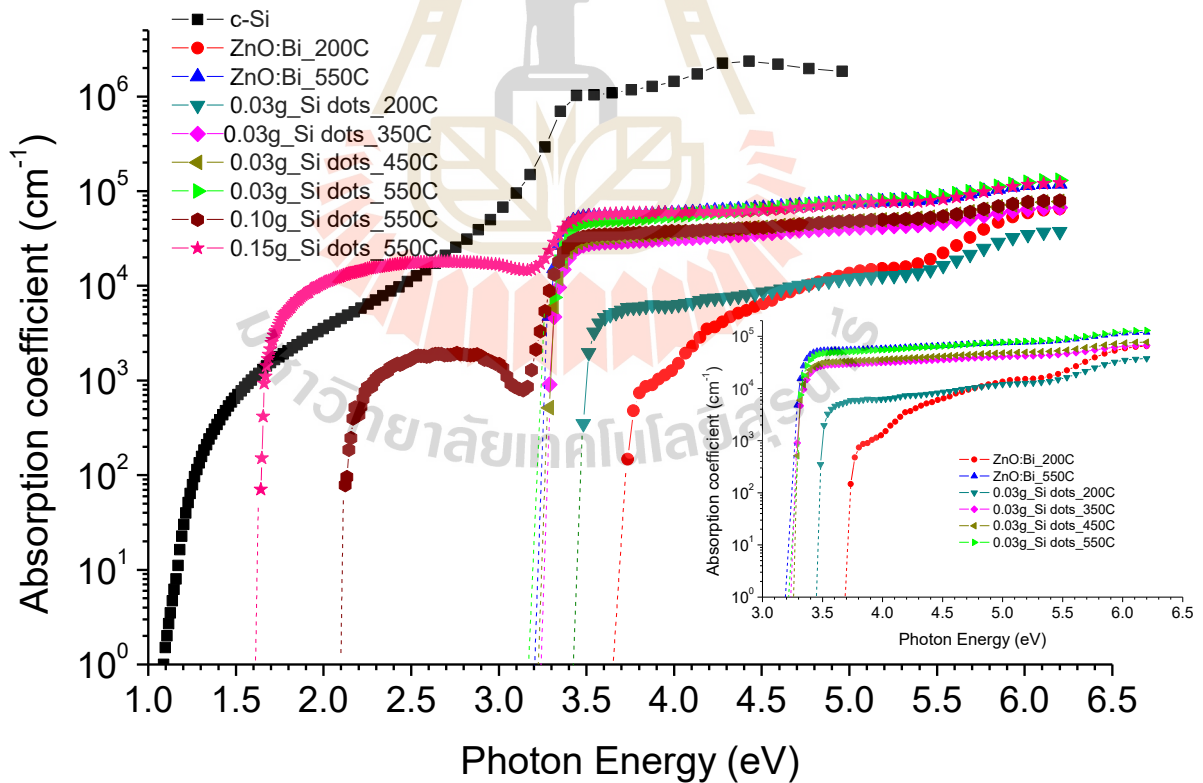
รูปที่ 3.23 สเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi ที่เจือไนไซปริมาณผงซิลิคอน

ค่าทางแสง %R และ %T ที่วัดได้จากฟิล์ม Si dots สามารถนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง แสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.10) และสามารถประมาณค่าช่องพลังงานทางแสง (Optical energy gap, E_g) ของฟิล์มบาง Si dots ในเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของ Si

$$\alpha = \frac{1}{t} \ln \left(\frac{\sqrt{(1-R)^4 + 4T^2R^2} - (1-R)^2}{2TR} \right) \quad (3.10)$$

เมื่อ α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง [cm^{-1}] t คือความหนาของฟิล์มบาง [cm] T คือค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง R คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแสง

รูปที่ 3.24 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์ม Si dots ที่เงื่อนไขปริมาณผง Si จากผลพบว่าฟิล์มบาง 0.15g Si dots และ 0.1g Si dots แสดงขอบของการดูดกลืนแสง (Absorption edge) ซึ่งบ่งบอกค่า E_g เลื่อนไปทางพลังงานที่สูงขึ้นที่ย่าน Visible light ที่ประมาณ 1.65eV (red) และ 2.1 eV (yellow) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลึกซิลิคอน (c-Si) ซึ่งมีขอบการดูดกลืนที่ประมาณ 1.1 eV หรือคลื่นแสงอินฟราเรด อย่างไรก็ตามฟิล์ม 0.03g Si dots ที่มีความหนาแน่นของซิลิคอนต่ำสุดให้ลักษณะการดูดกลืนคล้ายกับฟิล์มบาง ZnO:Bi ที่มีขอบการดูดกลืนแสงในช่วงพลังงานสูงประมาณ 3.2-3.4 eV จากคุณสมบัติดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มอิมิตเตอร์รับแสงในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ได้



รูปที่ 3.24 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi ในเงื่อนไขปริมาณผงซิลิคอน

ค่าคงที่ทางแสงอื่น ๆ เช่นดัชนีหักเหของแสงเชิงซ้อน (Complex refractive index: N) ซึ่งประกอบด้วยพจน์จำนวนจริงของดัชนีหักเหแสง (n) และพจน์จำนวนจินตภาพของสัมประสิทธิ์การสูญหาย (extinction coefficient: k) สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.11) อีกทั้งยังสามารถคำนวณหาค่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเชิงซ้อน (Complex relative dielectric constant: ϵ) โดยมี ϵ_1 และ ϵ_2 ที่เป็นพจน์จำนวนจริงและพจน์จินตภาพตามลำดับ โดยมีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้ แสดงกราฟในรูปที่ 3.25

$$N = n - ik \quad (3.11)$$

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (3.12)$$

$$\epsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (3.13)$$

$$\epsilon_2 = 2nk \quad (3.13)$$

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (3.14)$$

$$k = \frac{\alpha\lambda}{4\pi} \quad (3.15)$$

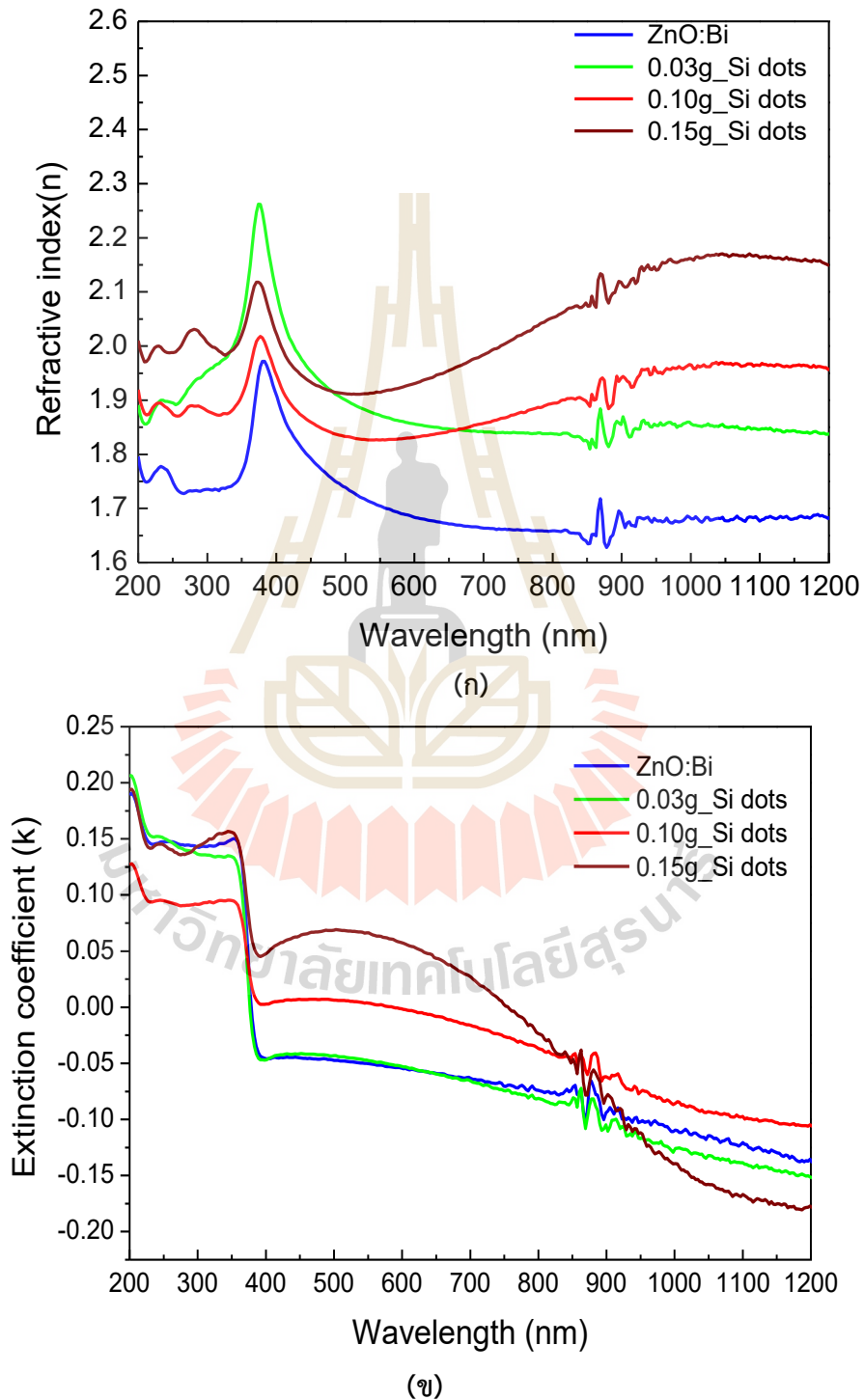
รูปที่ 3.25 (ก)-(ข) แสดงสเปกตรัมค่าดัชนีหักเหแสง, n และ ค่าสูญหายทางแสง k ตามลำดับ พบว่าในช่วงความยาวคลื่น 200-1200 nm วัสดุเฟส ZnO:Bi ให้สเปกตรัมค่า n แตกต่างกันมากมีค่าอยู่ระหว่าง 1.62-1.97 เมื่อมีส่วนผสมของผลึกนาโนซิลิคอน ค่าของ n ที่เปลี่ยนแปลงลดลงตามปริมาณของเฟส nc-Si ที่เพิ่มขึ้น โดยฟิล์ม 0.15g_Si dots ให้สเปกตรัมค่า n มีค่าอยู่ระหว่าง 1.91-2.17

3.6 สรุป

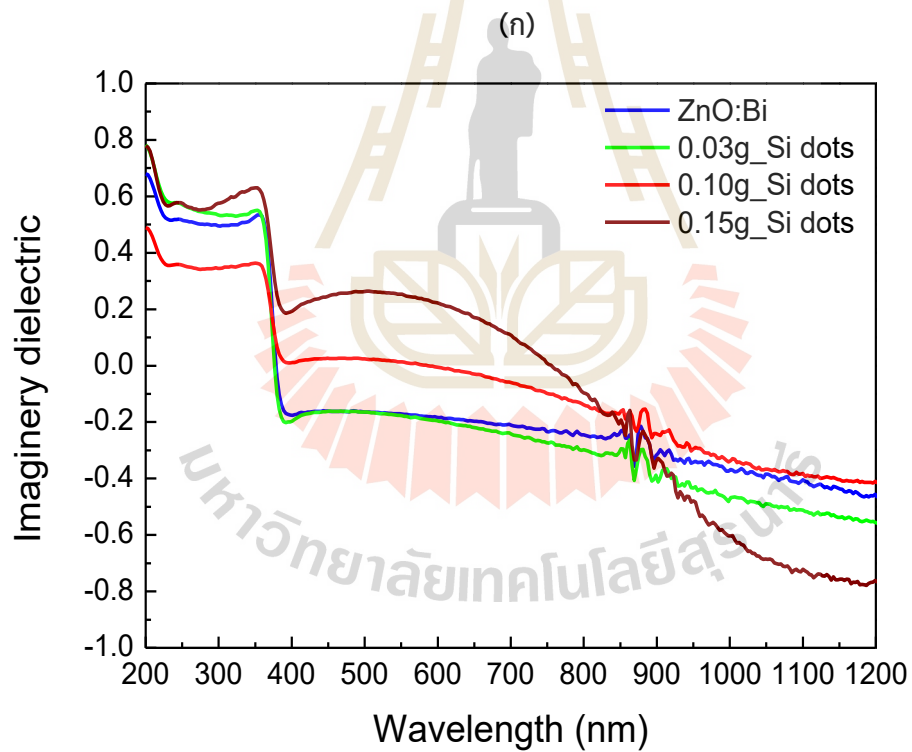
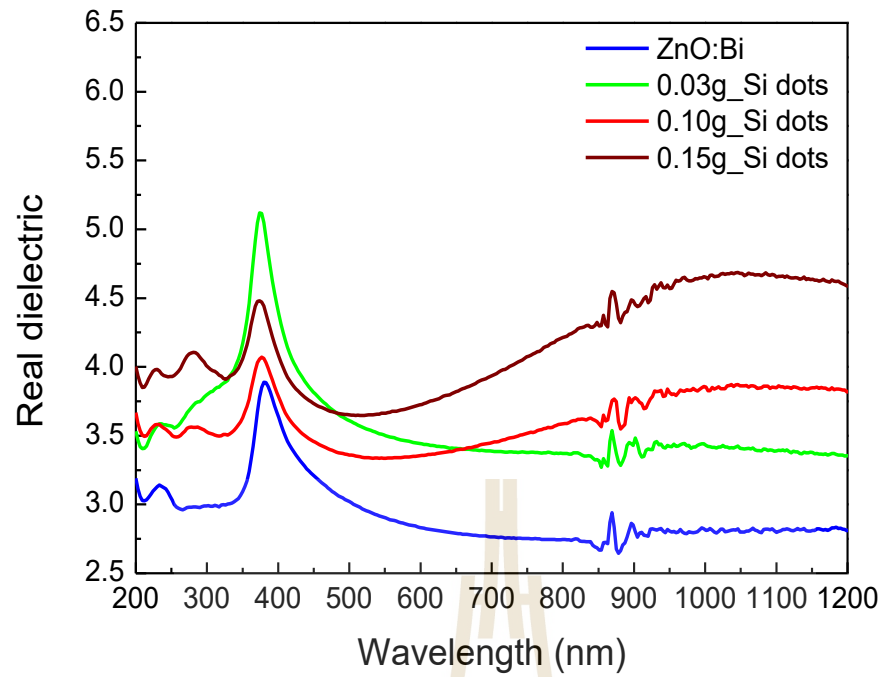
ฟิล์ม Si dots ในงานวิจัยนี้เน้นวิธีเตรียมจากหมึกสารละลายและเคลือบผิวด้วยวิธีการพิมพ์ลาย (Screen printing) และการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) ความเข้มข้นของปริมาณผงซิลิคอนและตัวกลางเมตริกซ์มีผลอย่างมากต่อสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสง จากการผลการวิเคราะห์พบว่าหมึก Si ที่มีความหนาแน่นของ Si สูงในสาร blinder ชนิดสารละลายอินทรีย์ มีลักษณะที่ทึบแสง ไม่เกิดกระแสโฟโตที่ดี แต่สามารถใช้เป็นแหล่งสารเจือเพื่อแพร่สารในบางบริเวณได้ ซึ่งเป็นแนวทางในการพัฒนาใช้เป็นแหล่งสารเจือให้กับบริเวณ Selective emitter ในเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนประสิทธิภาพสูง

ฟิล์มบาง Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi ในส่วนผสมของปริมาณผง Si น้อย เพื่อให้เกิดสมบัติกึ่งโปร่งแสง จากผลการวัดพบว่า ให้กระแสไฟฟ้าโฟโตที่สูง มีค่าประมาณ 10^3 เท่า ปริมาณผง Si ในฟิล์มมากขึ้นมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของฟิล์ม Si dots อย่างไรก็ตามฟิล์มที่มีปริมาณผงมาก

ขึ้นให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในระดับที่สูง และมีขอบการดูดกลืนแสงหรือบ่งบอกถึงค่าช่องว่างพลังงานทางแสง (E_g) นั้นมีการเลื่อนไปทางคลื่นสั้นหรือพลังงานโฟตอนที่สูงขึ้นเป็น 1.5-2.0eV แต่สำหรับฟิล์ม Si dots ที่มีปริมาณผงน้อยบ่งบอกถึงค่า E_g ที่กว้างใกล้เคียงกับฟิล์ม ZnO:Bi ซึ่งตอบสนองแสง UV ได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาความเหมาะสมในเงื่อนไขของฟิล์ม Si dots ให้ได้สมบัติทางไฟฟ้าและแสงที่ยอมรับได้สำหรับเป็นทางเลือกของชั้นรับแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่



รูปที่ 3.25 (ก)-(ข) สเปกตรัมดัชนีหักเหแสง, n และ ค่าสูญหายทางแสง k ตามลำดับ



รูปที่ 3.26 (ก)-(ข) สเปกตรัมไดอิเล็กทริกเทอมจริง ϵ_1 และเทอมจินตภาพ ϵ_2 ตามลำดับ

บทที่ 4

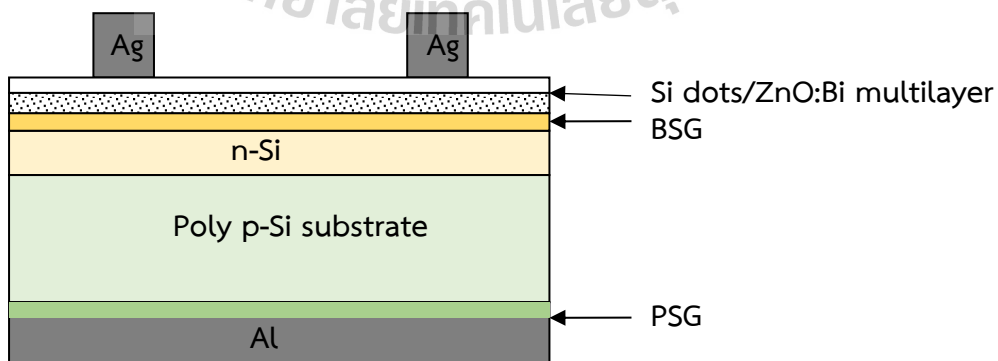
เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนต้นแบบผลึกนาโนซิลิคอนดอท

4.1 บทนำ

จากความสำเร็จในการสังเคราะห์ฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi ที่ให้คุณสมบัติ Photoactivity ที่ดี ไม่เกิดผลของการลดลงของกระแสในสภาวะแสงตกกระทบ (Light induced degradation, LID) ให้ค่ากระแสโฟโตที่สูง ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่ (Emerging solar cells) มากขึ้น และได้รับความสนใจในวิธีหรือเทคนิคต้นทุนต่ำที่มีมากขึ้น เช่นวิธีการผลิตชั้นฟิล์มด้วยสารละลาย หรือหมึกนาโน และศึกษาใช้วัสดุใหม่ชนิดอินทรีย์ หรือผสมผสานอินทรีย์มากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำศึกษานานแนวทางการผลิตต้นแบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกนาโนซิลิคอนดอท รายละเอียดการผลิตเซลล์ การวัดและทดสอบประสิทธิภาพกล่าวในบทที่ 4

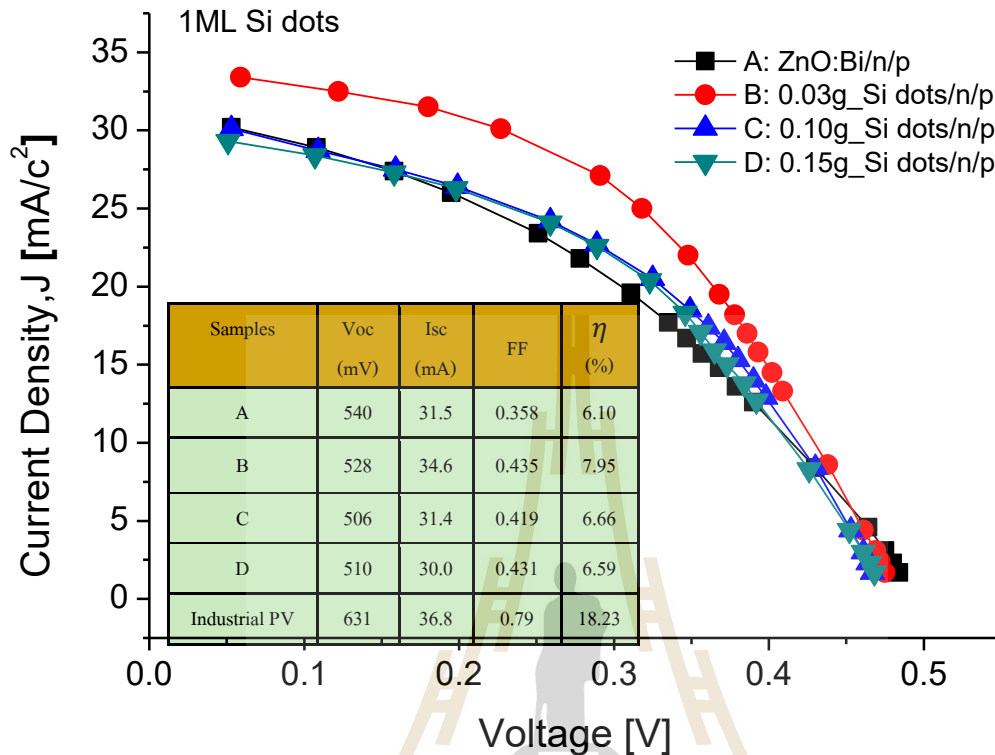
4.2 การผลิตต้นแบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกนาโนซิลิคอนดอท

งานนี้ได้ดำเนินการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ Si dots ต้นแบบขนาด 1.5cm×1.5cm โครงสร้างประกอบด้วยแผ่นฐาน p-Si ชนิดผลึกหลายรูปมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นประมาณ 90-95 โอห์ม/sheet ชั้น n-Si หนาประมาณ 0.5 ไมโครเมตร ด้วยวิธีการ Thermal diffusion และเคลือบแผ่นฟิล์ม Si dots/ZnO:Bi multilayers บนชั้น n-Si อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 550 °C และสร้างขั้วไฟฟ้า Ag paste ด้านบน และ Al paste ด้านหลังด้วยวิธี Screen printing ใช้ Mesh เบอร์ 100 หลังจากนั้นผ่านกระบวนการ Fast firing ที่สร้างขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบด้วย 4 Zones เรียงตามลำดับดังนี้ Drying zone (300°C) Burning zone (500°C) Firing zone (850 °C) และ Cooling zone (100 °C) ใช้เวลาแช่ไฟ 15 วินาทีในแต่ละ Zone



รูปที่ 4.1 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ Si dots ต้นแบบสำหรับแนวทางการศึกษาพัฒนาในเบื้องต้น

เซลล์แสงอาทิตย์ผลึกนาโนซิลิคอนต่อทในเมตริกซ์ ZnO:Bi ที่ผลิตได้นำไปวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานภายใต้แสงเทียมของหลอดฮาโลเจนที่ความเข้มแสงประมาณ $100\text{mW}/\text{cm}^2$



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi ในเงื่อนไขความหนาแน่น Si dots

รูปที่ 4.2 แสดงผลการวัด J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ Si dots ที่มีความหนาแน่นของเม็ดผลึก Si ในเมตริกซ์ ZnO:Bi ในเงื่อนไขของหมึก Si ที่ใช้ปริมาณ Si powder เท่ากับ 0.03g 0.10g และ 0.15g และฟิล์มบาง ZnO:Bi ที่ไม่มี Si dots ตารางในกราฟแสดงพารามิเตอร์ V_{oc} I_{sc} FF และค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (%) จากผลการวัดพบว่า ในเซลล์ B ที่ประกอบด้วยเฟสของ Si dots น้อยให้ค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่าเซลล์ A ที่ไม่มีเฟสของ Si dots แต่กระแสลัดวงจรมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นของ Si dots เพิ่มขึ้นในเซลล์ C และ D แสดงถึงผลของ %Weight reflectance (%WR) ที่สูงขึ้นตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ปริมาณ Si dots ที่สูงขึ้นมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงขึ้น ดังนั้นการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีจึงต้องคำนึงถึงทุกปัจจัยที่เกี่ยวข้องและเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อให้ประสิทธิภาพดีที่สุด แม้ว่าเซลล์ที่มีส่วนผสมของ Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าฟิล์ม ZnO:Bi แต่ประสิทธิภาพของเซลล์ต้นแบบยังมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเซลล์คุณภาพสูงที่ผลิตในระดับอุตสาหกรรม โดยมีสาเหตุดังนี้

1. ผลกระทบจากการไม่มีชั้นพาสซีเวชัน SiN_x ด้านบนเพื่อช่วยลดผลของการรวมตัวใหม่ของพาหะ ทำให้ ค่ากระแสลัดวงจร (J_{sc}) ต่ำ ดังนั้นชั้นพาสซีเวชันจะสามารถให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 3-5 mA

2. ผลกระทบจากกระบวนการ Fast Firing ที่ใช้ไฟฟ้าด้านบน-หลังในระดัับ 850°C ซึ่งยังไม่สูงเพียงพอเพื่อให้เกิดชั้นสนามไฟฟ้าที่ด้านหลัง (Back surface field, BSF) ที่ดีพอที่รอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้า ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) ต่ำ ดังนั้นชั้น BSF ที่ดีนี้จะสามารถให้แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรสูงขึ้นอีกประมาณ 100-150 mV

3. ค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF) ต่ำ จากอุณหภูมิ Fast Firing ต่ำ ทำให้เกิดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ขั้วสัมผัส (Contact resistance, R_c) มีค่าสูงที่ขั้วด้านบนและด้านหลังเซลล์ เมื่อลดผลของค่า R_c จากการปรับปรุงระบบ Firing จะสามารถเพิ่มค่า FF สูงขึ้นอีกประมาณ 20-30%

4. ขนาดของ Mesh พิมพ์ลายขั้วไฟฟ้าในเบอร์ 100 มีช่องผ่านสารละลายขนาดใหญ่กว่าขนาดเมสในอุตสาหกรรมที่ใช้ Mesh เบอร์ 400 ทำให้ขั้วไฟฟ้าที่พิมพ์ลายได้นั้นมีความหนาแน่นมากกว่าการผลิตในอุตสาหกรรม เมื่อผ่านกระบวนการ Fast firing อาจทำให้เกิดบริเวณสนามไฟฟ้าด้านหลัง (Back surface field, BSF) มีประสิทธิภาพที่น้อยกว่า

จากผลการทดสอบวัตต์เซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ แสดงถึงแนวทางการใช้ฟิล์มบาง Si dots เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน ถ้าลดผลกระทบข้างต้นดังกล่าว คาดว่าได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเพิ่มขึ้น 1.0% จากเซลล์มาตรฐาน เนื่องจากคุณสมบัติของฟิล์ม nc-Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi ที่ให้กระแสไฟฟ้าโฟโตเพิ่มขึ้น

4.3 สรุป

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการหาแนวทางการใช้ฟิล์ม Si dots ในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่ เพราะฟิล์มบาง Si dots มีสมบัติ Photoactivity ที่ดีให้ค่ากระแสไฟฟ้าโฟโตที่สูง เมื่อนำมาเคลือบบนแผ่นซิลิคอนรอยต่อ p-n เพื่อสร้างเป็นชั้นพาสซีเวชันด้านบนเซลล์ โดยเฉพาะฟิล์ม Si dots ที่ความหนาแน่นน้อย ๆ สามารถให้ลดผลจุดบกพร่องที่ผิวสัมผัส และเกิดกระแสลัดวงจรในเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้น

บทที่ 5

การวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วย และความคุ้มค่า

5.1 บทนำ

ต้นแบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกนาโนซิลิคอนดอทที่ประกอบด้วยชั้นฟิล์มบางคอมโพสิต Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi สามารถแปลงพลังงานแสงโฟตอนเป็นไฟฟ้าได้ เมื่อมีส่วนผสมของ nc-Si ในเมตริกซ์ ZnO:Bi ช่วยสามารถเพิ่มกระแสไฟฟ้าโฟโตได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่มี nc-Si วิธีการศึกษานี้จึงเป็นการนำร่องการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนให้สูงมากขึ้น ด้วยการนำผลึกซิลิคอนที่สามารถผลิตได้เองมาเป็นชั้นดูดกลืนแสง ดังนั้นเมื่อพิจารณาการผลิตเซลล์ตามกระบวนการมาตรฐานอุตสาหกรรม โดยเพิ่มส่วนของชั้นฟิล์มบางคอมโพสิต Si dots คาดว่าเซลล์จะให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเพิ่มขึ้น 1.46% จากเซลล์มาตรฐาน เนื่องจากคุณสมบัติของฟิล์ม nc-Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi ที่ให้กระแสไฟฟ้าโฟโตเพิ่มขึ้น จากการคาดการณ์ดังกล่าวในบทที่ 5 จะได้ศึกษาวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วย และความคุ้มค่า เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาการผลิตไปสู่ระดับอุตสาหกรรมในอนาคต

5.2 การวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วย และความคุ้มค่า

ต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์มาจากส่วนหลัก ๆ ที่ประกอบด้วยค่าเครื่องจักร ค่าบำรุงเครื่องจักร ค่าเสื่อมราคา ค่าวัตถุดิบ ค่าจ้างพนักงาน ค่าวัสดุสิ้นเปลือง ค่าสาธารณูปโภคที่เกี่ยวข้อง ค่าจัดเก็บและการบรรจุ แสดงรายละเอียดในตารางที่ 5.1 ในงานศึกษานี้ได้นำข้อมูลต้นทุนการผลิตจากบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) มาเป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับการผลิตเซลล์ LBSF ด้วยวิธีต้นทุนต่ำจากการประทับลาย เพื่อความถ่วงดุลค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อหนึ่งแผ่นเซลล์มาตรฐาน (Watt/cell) ซึ่งเซลล์ 1 แผ่นมีขนาด 243.36 cm^2 การวิเคราะห์ต้นทุนได้พิจารณาความสามารถในการผลิตเซลล์ของเครื่องจักรได้ทั้งหมด 10 ล้านเซลล์

รูปที่ 5.1 และ 5.2 แสดงสัดส่วนของต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าแผ่นเซลล์ผลึกซิลิคอนมีสัดส่วนสูงสุดประมาณ 57% ของต้นทุนการผลิตเซลล์ทั้งหมด หรือพิจารณาเป็นราคาประมาณ 10.04 cent/Watt และมูลค่าการซ่อมบำรุงเครื่องจักรมีสัดส่วนน้อยที่สุดประมาณ 3% หรือประมาณ 0.53 cent/Watt ข้อมูลทั้งหมดได้จากบริษัทโซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน)

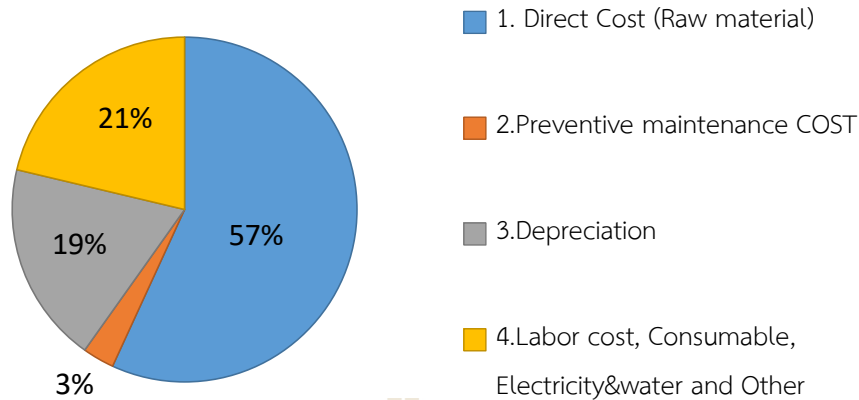
ในการศึกษานี้ได้ตั้งสมมุติฐานและประมาณค่าประสิทธิภาพของเซลล์ที่มีส่วนประกอบของชั้นฟิล์มบางคอมโพสิต Si dots ไว้ให้มีค่าสูงกว่าเซลล์มาตรฐานประมาณ 1.46% เพื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตของเซลล์มาตรฐานกับเซลล์ที่มีส่วนของชั้นฟิล์มบางคอมโพสิต Si dots จากข้อมูลการผลิตเซลล์มาตรฐานประสิทธิภาพ 18.4% หรือ 4.521 watt/cell มีต้นทุนการผลิตรวมที่ 79.840 cent/cell หรือ 17.66 cent/watt จากการคาดการณ์ต้นทุนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกนาโนซิลิคอนดอทที่ประกอบด้วยชั้นฟิล์มบางคอมโพสิต Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi บนพื้นฐานข้อมูลที่ว่า

เซลล์ จะสามารถให้ประสิทธิภาพสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 1.46% หรือให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานประมาณ 19.86% หรือคิดเป็น 4.879 watt/cell พบว่ามีต้นทุนการผลิตรวมอยู่ที่ 80.405 cent/cell หรือ 16.48 cent/watt ผลดังกล่าวสรุปได้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์ผลึกนาโนซิลิคอนดอทที่ประกอบด้วยชั้นฟิล์มบางคอมโพสิต Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi เมื่อนำไปสู่การผลิตในอุตสาหกรรมมีความคุ้มค่า เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่ถูกลงเมื่อเทียบกับผลผลิตกำลังไฟฟ้า (watt) ที่ได้จากเซลล์ โดยให้ต้นทุนการผลิตลดลงประมาณ 1.18 cent/watt

ตารางที่ 5.1 ส่วนประกอบของต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์

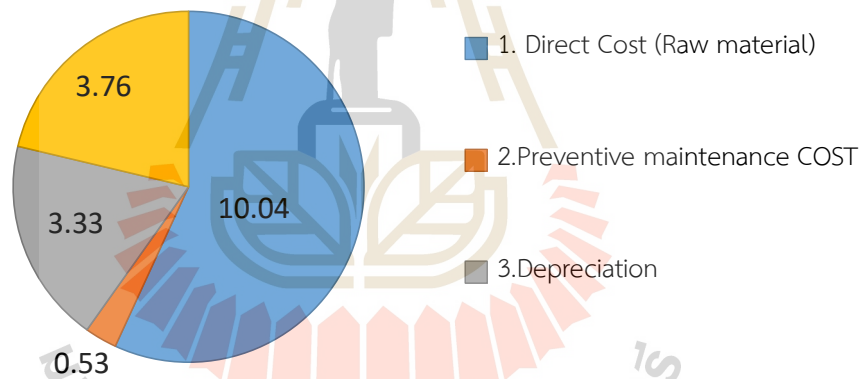
| ชนิดของต้นทุน | ลักษณะ | วัสดุ | |
|---|----------------------|---|--|
| 1. Direct Cost (Raw material) | Wafer | c-Si wafers | |
| | Chemical | HF, HNO ₃ , Texture Additive, HCl and KOH | |
| | Gas | Liquid Nitrogen, SiH ₄ , POCl ₃ , O ₂ and NH ₃ | |
| | Metal Paste | Silver Paste for Front Contact | |
| | | Silver Paste for Rear Contact | |
| | | Aluminium Paste for Rear side | |
| | Screen and squeegee | Screen for Ag front contact | |
| | | Screen for Ag rear contact | |
| | | Screen for Al rear contact | |
| Squeegee Rubber | | | |
| 2. Preventive maintenance COST (ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักร) | Standard machine | ค่าซ่อมบำรุง เช่น สายพาน, มอเตอร์, หลอดไฟ, สายไฟ, ท่อแก๊ส, ท่อสารเคมี และ ชิ้นส่วนเสื่อมสภาพ อื่น ๆ | |
| 3. Depreciation (ค่าเสื่อมสภาพเครื่องจักรและอาคารสถานที่) | Standard machine | ค่าเสื่อมสภาพ = (ราคาต้นทุน-ราคาซาก)/อายุการใช้งาน | |
| 4. Labor cost, Consumable, Electricity & water and Other | ค่าแรงและสาธารณูปโภค | ค่าจ้างพนักงาน วัสดุสิ้นเปลือง ค่าน้ำ ค่าไฟ ค่าแพคเกจ | |

Cost of standard solar cell



รูปที่ 5.1 สัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของประเภทต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนในเชิงพาณิชย์

Cost of standard solar cell (cents/watt)



รูปที่ 5.2 ประเภทต้นทุนราคา (cent/watt) การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนในเชิงพาณิชย์

ตารางที่ 5.2 คาดการณ์ต้นทุนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกนาโนซิลิคอนดอทที่ประกอบด้วยชั้นฟิล์มบางคอมโพสิต Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi

| COST classification | Cell (Pcs.) = 10,000,000.00 pcs / 1 year | | | |
|-------------------------------|---|-------------------------|--------------------------|----------------------------|
| | ● เซลล์ nc-Si dots %PCE = 19.86% ให้ 4.88 watt/cell หรือ 48,797,137.13 watt /1 year | | | |
| Types | COST Amount (THB) | COST per pcs (THB/pcs.) | COST per Watt (THB/watt) | COST per watt (cents/watt) |
| 1. Direct Cost (Raw material) | | | | |
| Wafer | 66,000,000.00 | 6.60 | 1.35 | 4.10 |
| Chemical | 14,976,040.74 | 1.50 | 0.31 | 0.93 |

| | | | | |
|--|-----------------------|--------------|-------------|--------------|
| Gas | 29,382,375.28 | 2.94 | 0.60 | 1.82 |
| Metal Paste | 34,720,164.66 | 3.47 | 0.71 | 2.16 |
| Screen and Squeegee | 4,684,683.44 | 0.47 | 0.10 | 0.29 |
| Additional chemical | 1,848,366.69 | 0.185 | 0.038 | 0.115 |
| Additional Spin coater | 26,258.00 | 0.003 | 0.001 | 0.002 |
| Additional Flash foam | 23,598.54 | 0.002 | 0.0005 | 0.001 |
| Si dots Cell Cost Sum #1 | 151,661,487.37 | 15.17 | 3.11 | 9.42 |
| 2. Preventive maintenance COST | | | | |
| Standard machine | 7,832,704.62 | 0.78 | 0.16 | 0.49 |
| Additional stamp machine | 5,000.00 | 0.001 | 0.0001 | 0.0003 |
| Si dots Cell Cost Sum #2 | 7,837,704.62 | 0.78 | 0.16 | 0.49 |
| 3. Depreciation | | | | |
| Standard machine | 49,733,573.99 | 4.97 | 1.02 | 3.09 |
| Additional stamp machine | 20,000.00 | 0.0020 | 0.0004 | 0.001 |
| Si dots Cell Cost Sum #3 | 49,753,573.99 | 4.98 | 1.02 | 3.09 |
| 4. Labor cost, Consumable, Electricity & water and Others | 56,072,564.13 | 5.61 | 1.15 | 3.48 |
| Total cost for Si dots Cell | 265,325,330.10 | 26.53 | 5.44 | 16.48 |
| Total Watt for standard Cell = 4.52 Watt/piece and Total Cost = 17.66 cent/Watt (PCE = 18%) | | | | |
| Total Watt for Si dots Cell = 4.91 Watt/piece and Total Cost = 16.48 cent/Watt (PCE = 19.86%) | | | | |

*หมายเหตุ ใช้อัตราแลกเปลี่ยน 1 US = 33 บาท

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกโพลีซิลิคอนโครงสร้างมาตรฐานอุตสาหกรรมในประเทศไทย กับการคาดการณ์ต้นทุนการผลิตเซลล์ในงานวิจัย

| COST classification | Cell (Pcs.) = 10,000,000.00 pcs / 1 year | |
|---------------------|--|----------------------------|
| | <ul style="list-style-type: none"> • เซลล์ในอุตสาหกรรม %PCE = 18% ให้ 4.52 watt/cell หรือ 45,209,835.00 watt /1 year • เซลล์ nc-Si dots %PCE = 19.54% ให้ 4.88 watt/cell หรือ 48,797,137.13 watt /1 year | |
| COST Structure | Standard 4.52 watt/cell | Silicon ink 4.88 watt/cell |
| Direct Cost RM | | |
| Wafer | 4.42 | 4.10 |
| Chemical | 1.00 | 0.93 |
| Gas | 1.97 | 1.82 |
| Paste | 2.33 | 2.16 |
| Screen and Squeegee | 0.31 | 0.29 |
| Additional chemical | - | 0.11 |

| | | |
|--------------------------------------|--------------|--------------|
| Additional gas | - | 0.00 |
| Flash foam | - | 0.002 |
| PM COST | | |
| Standard machine | 0.53 | 0.49 |
| Stamp machine | - | 0.0003 |
| Depreciation | | |
| Standard machine | 3.33 | 3.09 |
| Additional machine | - | 0.001 |
| Other | 3.76 | 3.48 |
| Total Cost /watt (cents/watt) | 17.66 | 16.48 |

5.3 สรุป

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการใช้ฟิล์ม Si dots ที่มีคุณสมบัติ Photoactivity ที่ดีให้ค่ากระแสไฟฟ้าโฟโตที่สูง มาเป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ (ARC) และรับแสงเพื่อผลิตพาหะเพิ่มขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์ เรียกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกนาโนซิลิคอนดอท จากการพิจารณาความคุ้มค่าได้คาดการณ์ว่าเมื่อนำเซลล์ไปผลิตในกระบวนการมาตรฐานในระดับอุตสาหกรรมจะมีความคุ้มค่า เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่ถูกลงเมื่อเทียบกับผลผลิตกำลังไฟฟ้า (watt) ที่ได้จากเซลล์ โดยให้ต้นทุนการผลิตลดลงประมาณ 1.18 cent/watt

บทที่ 6

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลงานวิจัย

6.1.1 การผลิตผงผลึกซิลิคอนด้วยวิธีต้นทุนต่ำ

ได้ประสบความสำเร็จในการผลิตผงผลึกซิลิคอนด้วยวิธี Zirconia Grinding Balls เป็นวิธีการผลิตผงขนาดเล็กด้วยการบด ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และต้นทุนต่ำกว่าวิธีอื่น การศึกษานี้ได้ใช้แผ่นซิลิคอนที่เสื่อมสภาพ หรือแผ่นที่เสียหายสามารถนำมารีไซเคิล เพื่อผลิตเป็นผงซิลิคอน พบว่าผงที่ได้นั้นมีเปอร์เซ็นต์ผลผลิต (%yield) เท่ากับ 88.06% ซึ่งให้ค่าสูง ขนาดผงซิลิคอนที่พบไม่เกิน 20 ไมครอน และขนาดไม่เล็กกว่า 0.7 ไมครอน

คุณภาพของผลึกซิลิคอนวิเคราะห์จากสเปกตรัม XRD พบลักษณะของผลึกแบบหลายรูป (Polycrystalline Si) และพบปริมาณผลึกที่ระนาบ (111) พบมากที่สุด ค่า Lattice ของผงผลึกซิลิคอนมีค่าเกือบเท่ากับค่า Lattice ของก้อนผลึกคือ 5.430 Å และมีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอมประมาณ 3.135 Å ผลึกมีความเครียดแบบ Compressive strain เท่ากับ 1.35

6.1.2 การผลิตหมึกซิลิคอนต่อทექซ์ชั้นสูงในสารละลายออร์แกนิก

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการผลิตหมึกซิลิคอนต่อทექซ์ชั้นสูงในสารละลายออร์แกนิกที่สามารถปรับเปลี่ยนสัดส่วนสารเจือฟอสฟอรัสจากสารละลายประกอบของ TEOS sol-gel ในหมึก เมื่อนำมาเคลือบแบบพิมพ์ลาย (Screen printing) บนแผ่นฐานควอทซ์ ซึ่งมีแรงตึงผิวสูง ฟิล์ม Si dots เข้มชั้นสูงที่ได้มีการยึดเกาะแผ่นควอทซ์ที่ดี ไม่มีรอยร้าว ฟิล์มกระจายสม่ำเสมอและไม่พบการหลุดหลุดร่อนของฟิล์ม แสดงให้เห็นว่าหมึกที่สังเคราะห์ได้นั้นสามารถผลิตเป็นฟิล์ม Si dots ที่มีความหนาแน่นของผง Si สูงบนแผ่นฐานกระจกที่มีแรงตึงผิวสูงได้ ดังนั้นในกรณีที่น่าฟิล์มไปเคลือบบนแผ่นฐานซิลิคอนจะไม่ส่งผลการหลุดร่อนขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิต n^{++} บริเวณลายขั้วไฟฟ้ากริดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Selective emitter ได้ จากผลการทดสอบฟิล์มพบความสามารถในการแพร่สารเจือที่ตีที่อุณหภูมิ $500^{\circ}\text{C} - 700^{\circ}\text{C}$

ฟิล์ม Si dots เข้มชั้นสูงให้สมบัติรอยสัมผัสขั้วไฟฟ้า Ag/Si dots แบบ Ohmic contact ทำให้เหมาะสมสำหรับ Selective emitter อย่างไรก็ตามฟิล์ม Si dots เข้มชั้นสูง เกิดผลกระทบของ Light induced degradation, LID แสดงให้เห็นว่าฟิล์ม Si dots หนาแน่นสูง ไม่เหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นชั้นรับแสงเพื่อผลิต free charge carrier แต่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มฐานรอง หรือเป็นแหล่งสารเจือ

เพื่อแพร่สารในบางบริเวณที่ต้องการได้เช่น บริเวณด้านหน้าสำหรับผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Selective emitter

6.1.3 หมึกซิลิคอนต่อทเข้มข้นต่ำในสารละลาย ZnAc

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์หมึกซิลิคอนเข้มข้นต่ำในสารละลาย ZnAc และเคลือบบนแผ่นฐานรองซิลิคอนหรือควอทซ์ด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) फिल्म Si dot ในเมตริกซ์ ZnO:Bi ที่ได้สามารถปรับเปลี่ยนปริมาณความหนาแน่นของ Si dots จากปริมาณผงผลึกซิลิคอนในส่วนผสมของหมึก फिल्म Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi มีลักษณะของ Si dots เป็นผลึกหลายรูปเกรนผลึกแต่ละระนาบมีขนาดประมาณระหว่าง 34 nm – 66 nm และมีผลึกทรงกลมขนาดเล็กของ ZnO:Bi ขนาดระหว่าง 11 nm – 23 nm ห่อหุ้มอนุภาค Si dots ส่งผลให้เกิดคุณสมบัติ Photoactivity ที่ดี ไม่เกิดผลของการลดลงของกระแสในสภาวะแสงตกกระทบ (Light induced degradation, LID) ให้ค่ากระแสโฟโตที่สูงขึ้นถึง 10^3 เท่าเทียบกับกระแสมืด

ฟิล์ม Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi ที่มีอนุภาค Si dots ลดลง แสดงขอบของการดูดกลืนแสง (Absorption edge) ซึ่งบ่งบอกค่า E_g เลื่อนไปทางพลังงานที่สูงขึ้นที่ย่าน Visible light ที่ประมาณ 1.65eV (red) 2.1 eV (yellow) และ 3.2 eV (UV-Violet) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลึกซิลิคอน (c-Si) ซึ่งมีขอบการดูดกลืนที่ประมาณ 1.1 eV หรือคลื่นแสงอินฟราเรด จากคุณสมบัติดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มอิมิตเตอร์รับแสงในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ได้

6.1.4 ต้นแบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกนาโนซิลิคอนต่อท

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการผลิตต้นแบบเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกนาโน Si dots ด้วยเทคนิคต้นทูนต่ำในระบบบรรยากาศปกติ ด้วยการใช้หมึก Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi เป็นชั้นรับแสง เพื่อเป็นแนวทางการศึกษาใช้ฟิล์ม Si dots สำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการทดสอบพบว่า เซลล์ที่ประกอบด้วย Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi ที่มีปริมาณอนุภาค Si น้อยให้ค่ากระแสลัดวงจรสูงกว่าเซลล์ที่ไม่มีเฟสของ Si dots ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์ต้นแบบมีค่าประมาณ 7.95% ผลของความหนาแน่นของ Si dots ที่เพิ่มขึ้นส่งผลการลดลงของกระแสลัดวงจร เนื่องจาก %Weight reflectance (% WR) สูงขึ้นเมื่อเซลล์มีปริมาณ Si dots สูงขึ้น และ %T ลดลง ดังนั้นการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีจึงต้องคำนึงถึงทุกปัจจัยที่เกี่ยวข้องและเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

6.1.5 ความคุ้มค่าและต้นทุนต่อหน่วย

ในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตของเซลล์มาตรฐานกับเซลล์ที่มีส่วนของชั้นฟิล์มบางคอมโพสิต Si dots จากข้อมูลการผลิตเซลล์มาตรฐานประสิทธิภาพ 18.4% หรือ 4.521 watt/cell มีต้นทุนการผลิตรวมที่ 79.840 cent/cell หรือ 17.66 cent/watt จากการคาดการณ์ต้นทุนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกนาโนซิลิคอนต่อทที่ประกอบด้วยชั้นฟิล์มบางคอมโพสิต Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi บนพื้นฐานข้อมูลที่ว่าเซลล์ จะสามารถให้ประสิทธิภาพสูงกว่า

มาตรฐานประมาณ 1.46% หรือให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานประมาณ 19.86% หรือคิดเป็น 4.879 watt/cell พบว่ามีต้นทุนการผลิตรวมอยู่ที่ 80.405 cent/cell หรือ 16.48 cent/watt ผลดังกล่าวสรุปได้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์ผลึกนาโนซิลิคอนดอทที่ประกอบด้วยชั้นฟิล์มบางคอมโพสิต Si dots ในเมตริกซ์ ZnO:Bi เมื่อนำไปสู่การผลิตในอุตสาหกรรมมีความคุ้มค่า เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่ถูกลงเมื่อเทียบกับผลผลิตกำลังไฟฟ้า (watt) ที่ได้จากเซลล์ โดยให้ต้นทุนการผลิตลดลงประมาณ 1.18 cent/watt

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาแนวทางการนำหมึกซิลิคอนที่สังเคราะห์ได้มาใช้ประโยชน์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนเพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในช่วงพลังงานโฟตอนสูงกว่า 1.1eV เซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบผลึกซิลิคอนดอทจึงผลิตเพื่อศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าลัดวงจร อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าทุกตัว ดังนั้นแนวทางการปรับปรุงเซลล์ต้นแบบให้มีประสิทธิภาพเทียบเท่าเซลล์ที่ผลิตในระดับอุตสาหกรรม สามารถพิจารณาได้ดังนี้

- ลดผลกระทบของค่าความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิวด้านบน (Front surface recombination velocity) ด้วยชั้นพาสซีเวชัน SiN_x ด้านบนทำให้ค่ากระแสลัดวงจร (J_{sc}) เพิ่มขึ้นอีกประมาณ 3-5 mA/cm²
- ลดผลกระทบของค่าความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิวด้านหลัง (Back surface recombination velocity) ด้วยชั้นสนามไฟฟ้าที่ด้านหลัง (Back surface field, BSF) ให้เกิดบริเวณ p^{++} region ที่รอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าและแผ่นฐาน p-Si จากกระบวนการ Fast Firing ที่อุณหภูมิสูงเหมาะสม ในงานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่อง Fast firing พิกัดสูงสุดที่อุณหภูมิ 850°C ซึ่งอาจยังไม่สูงเพียงพอ จำเป็นต้องพัฒนาให้เพิ่มพิกัดอุณหภูมิสูงขึ้นไม่เกิน 970 °C เพื่อให้เกิดชั้น BSF ที่ดีทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) ต่ำ ดังนั้นชั้น BSF ที่ดีนี้จะสามารถให้แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรสูงขึ้นอีกประมาณ 100-150 mV
- ค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF) ต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิ Fast Firing ยังไม่เหมาะสมทำให้เกิดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ขั้วสัมผัส (Contact resistance, R_c) มีค่าสูงที่ขั้วด้านบนและด้านหลังเซลล์ การลดผลของค่า R_c จะสามารถเพิ่มค่า FF สูงขึ้นอีกประมาณ 20-30%

บรรณานุกรม

- [1] N. Mason, "High efficiency crystalline silicon PV cell manufacture: status and prospects", PVSAT-5, Glyndwr, Wales (2009)
- [2] R. Boppella, a, K. Anjaneyulu, Pratyay Basak, and Sunkara V. Manorama, "Facile Synthesis of Face Oriented ZnO Crystals: Tunable Polar Facets and Shape Induced Enhanced Photocatalytic Performance" J. Phys. Chem. C, 117, 4597–4605 (2013)
- [3] Fardad, M. A. et al., "Catalysts and the structure of SiO₂ sol-gel films", J. Mat. Sci. 35, 1835-1841 (2000).
- [4] Globus, T. et al., "Analysis of Refractive Index and Absorption Coefficient of Silicon Membranes", Proceedings of the 1997 International Semiconductor Device Research Symposium, Charlottesville VA, ISBN: 1-880920-05-0. (1997).
- [5] G. Conibeer, M. A. Green, R. Corkish, Y. Cho, E-C. Cho, C-W Jiang, T. Fangsuwannarak, E. Pink, Y. Huang, T. Puzzer, "Silicon Nanostructures for Third Generation Photovoltaic Solar Cells," Thin Solid Film, 511-512, 654 (2006).
- [6] T. Fangsuwannarak, E. Pink, Y. Huang, G. Scardera, G. Conibeer, M. A. Green, "Effects of Silicon Nanocrystallite Density on The Raman-Scattering Spectra of Silicon Quantum Dot Superlattices," Proc. SPIE 6415-07 (2006).
- [7] Harold Kintz, Xavier Paquez, Olivier Sublemontier, Yann Leconte, Nathalie Herlin-Boime, Cécile Reynaud, "Synthesis and layering of Si quantum dots/SiO₂ composite films for third generation solar cells", Thin Solid Films 593, 96–101 (2015).
- [8] S. R. Wenham, M. A. Green, M. E. Watt and R. Corkish, Applied Photovoltaics, 2nd edition, Earthscan, (2007).
- [9] ดุสิต เครื่องงามไม่สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่ม 2, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ครั้งที่ 1ม ISBN : 9-743-32817-3 (2542).
- [10] สุจิตรา วงศ์เกษมจิตต์., วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกระบวนการโซล-เจล สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [11] Anastasescu, M. et.al., "Loss of phosphorus in silica-phosphate sol-gel films, J. Sol-gel", Sci. Techno. 40, 325-333 (2006).
- [12] Apuzzo, M. D. et al., "Sol-gel synthesis of humidity-sensitive P₂O₅-SiO₂ anorphous films", J. Sol-gel. Sci Techno. 17, 247-254 (2000).

- [13] Brinker, C. J., and Scherer, G.W., "Sol-gel Science – The Physics and Chemistry of sol-gel processing", Academic Press, New York, (1990).
- [14] Dai, S., Ju, Y.H., Gao, H.J., Lin, J.S., Pennycook, S.J. and Barnes, C.E., Preparation of silica aerogel using ionic liquids as solvents," Chem. Commun., 243-244 (2000).
- [15] Elisa, M. et al., "Structure and thermal characterization of SiO₂-P₂O₅ sol-gel powders upon annealing at high temperatures," J. Non-Cryst. Solids. 326, 495-501 (2010).
- [16] Fangsuwannarak, T., Electronic and optical characterizations of silicon quantum dots and its applications in solar cells", Thesis submitted to the University of New South Wales, 44 (2007).
- [17] Fadad, M.A. et al., "Catalysts and the structure of SiO₂ sol-gel films", L. Mat. Sci. 35, 1835-1841 (2000).
- [18] Globus, T. et al., Analysis of refractive index and absorption coefficient of silicon membranes, "Proceedings of the 1997 International Semiconductor Device Research Symposium, Carlottesville VA, ISBN : 1-880920-05-0 (1997).
- [19] Green, M.A. et al., "Third generation photovoltaics, Centre for Photovoltaic Engineering", UNSW publisher (2000).
- [20] Green, M.A. et al., "Third generation photovoltaics : Ultra-high conversion efficiency at low cost," Prog. Photovolt : Res. Appl. 9, 123-135 (2001).
- [21] Green, M.A. et al., "This report is available from: ARC Photovoltaics Centre of Excellence", Prog. Photovolt : Res. Appl. 17, 77-80 (2009).
- [22] Innocenzi, P., "Infrared spectroscopy of sol-gel derived silica-based films: a spectral-microstructure overview," Journal Non-Crystal Solids 316, 309-319 (2003).
- [23] Jarger, R.C., "Introduction to microelectronic fabrication" Prentice-Hall (2001).
- [24] Kern, W., and Vossen, J., "Thin film processes", Academic Press : New York (1978).
- [25] Kern, W., "Handbook of Semiconductor Cleaning Technology", Noyrs Publishing : Park (1993).
- [26] Kirk, C. T., "Quantitative analysis of the effect of disorder-induced mode coupling on infrared absorption in silica", Physic Review B38, 1255-1273 (1988).
- [27] Lehmann, A., Schunmann, L. and Huebner, K., "Optical phonons in amorphous silicon oxides I. Calculation of the density of states and interpretation of LO-TO splittings of amorphous SiO₂" Physica Status Solidi B117, 689-698 (1983).

- [28] Li, W. et al., "Physical and Optical properties of sol-gel nano-silver doped silica film on glass substrate as a function of heat-treatment temperature", *J. Appl. Phys.* 93, (12) 9553-9561 (2003).
- [29] Lin, G. R. et al., "Gain analysis of optically-pumped si nanocrystal waveguide amplifiers on silicon substrate", *Optics Express* 18,9213-9219 (2010).
- [30] Loechelt, G. H., Cave, N. G., and Menendez, J., "Measuring the tensor nature of stress in silicon using polarized off-axis Raman spectroscopy", *Appl. Phys. Letts.* 66, 3639 (1995).
- [31] Massiot, Ph. et al., "Thermal evolution of sol-gel-obtained phosphosilicate solids (SIPO)", *J. Non-Crys. Solids.* 292, 158-166 (2001).
- [32] Mondragona, M.A. and Castano, V.M., "Vibrational analysis of $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ and spectroscopic studies on the formation of glasses via silica gel" *Vibrational spectroscopy* 9, 293-304 (1995).
- [33] Pankove, J. I., "Optical processes in semiconductors, New York, International Standard" ISBN : 0-486-60275-3 (1971).
- [34] Park, S. et al., "n-Type silicon quantum dots and p-type crystalline silicon heteroface solar cells", *Solar Energy Materials & Solar Cell* 93,684-690 (2009).
- [35] Prakash, S. et al., "Phosphorus-doped glass photon exchange membranes for low temperature direct methanol fuel cells", *Journal of Power Source* 175, 91-97 (2008).
- [36] Richter, H., Wang, Z. P., and Ley L., "The one phonon Raman Spectrum in microcrystalline silicon", *Solid Stat Commun* 39, 625 (1981).
- [37] Ruan, J. et al., "Stimulated emission in nanocrystalline silicon superlattices", *Appl. Phys. Lett.* 83, 54795481 (2003).
- [38] Saga, T. et al., "Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production", *NPG Asia Mater* 2(3), 96-102 (2010).
- [39] Schmidt, J.U. and Schmidt, B., "Investigation of Si nanocluster formation in sputter-deposited silicon sub-oxides for nanocluster memory structures", *Materials Science and Engineering B101*, 28-33 (2003).
- [40] Švrcek, V. et al., "Photoluminescence properties of sol-gel derived SiO_2 layers doped with porous silicon", *Mat. Sci Eng. C19*, 233-236 (2002).
- [41] Švrcek, V. et al., "Ex situ prepared Si nanocrystals embedded in silica glass : Formation and characterization", *J. Appl. Phys.* 95, 3158-3163 (2004).

- [42] Švrcek, V. et al., “Optical gain in porous silicon grains embedded in sol-gel derived SiO₂ matrix under femtosecond excitation”, J. Phys. Lett. 84, 3280-3282 (2004).
- [43] Sze, S.M., “Physics of semiconductor devices”, 2nd edition, John Wiley and Sons, 790-830 (1981).
- [44] Takeoka, S. et al., “Size-dependent photoluminescence from surface-oxidized Si nanocrystals in a weak confinement regime”, Physical Review B62, 16820-16825 (2000).
- [45] Thiyagu, S. et al., “Ultra-low reflectance, high absorption microcrystalline silicon nanostalagmite”, Nano. Res. Lett. 7,171 (2012).
- [46] Uma, T. and Nogami, M., “Synthesis and characterization of P₂O₅-SiO_{2-x} (x= phosphotungstic acid) glasses as electrolyte for low temperature H₂/O₂ fuel cell application”, Journal of Membrane Science 280, 744-751 (2006).
- [47] Wang, X. et al., “Preparation of mesoporous silica thin films on polystyrene substrate by electrochemically induced sol-gel technique”, Surface & Coatings Technology 204, 2187-2192 (2010).
- [48] Wenham, S.R., Green, M.A., Watt, M.E. and Corkish, R., “Applied Photovoltaics” 2nd edition, Eathscan (2007).
- [49] Yujie, T. et al., “Preparation of n⁺ emitter on p-type silicon wafer using the spin-on doping method”, Material science in Semiconductor processing 15, 359 (2012).
- [50] Zi J. et al., “Raman shifts in Si nanocrystals”, Applied Physical Letters 69, 200 (1996).
- [51] Zhang, R.J. et al., “Visible range whisperinggallery mode in microdisk array based on size-controlled Si nanocrystals”, Appl. Phys. Lett. 88, 153120 (2006).

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 0 4422 4582 0856613088
โทรสาร 0 4422 4601



thipwan@g.sut.ac.th

ผศ.ดร.ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์

Assistant Professor Dr. Thipwan Fangsuwannarak

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญาเอก

2551 Ph.D. (Photovoltaic Engineering) Centre of Excellence for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, University of New South Wales, Australia

ระดับปริญญาโท

2540 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (Electrical Engineering, Semiconductor Devices Research Laboratory, SDRL) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ

ระดับปริญญาตรี

2536 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับ 2 (B.Eng (2nd Honor in Electronic Engineering) มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล จ. นครราชสีมา

ประวัติการทำงาน

- 2540-ปัจจุบัน อาจารย์ประจำ และนักวิจัย วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี จ.นครราชสีมา
- 2557-ปัจจุบัน ผู้ทรงคุณวุฒิ ให้ข้อคิดเห็นและประเมินโครงการทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของ อาจารย์รุ่นใหม่ และทุนพัฒนานักวิจัย (รุ่นกลาง) ของฝ่ายวิชาการ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
- 2555 ที่ปรึกษา R&D group, Innovative Harvesting Energy, China
- 2554 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินข้อเสนอโครงการวิจัย ให้แก่วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล HDD สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2552-2554 วิทยากรผู้เชี่ยวชาญฝึกอบรมการผลิตและวิเคราะห์ฟิล์มบาง อุตสาหกรรมฮาร์ดิสไดฟ์ ให้แก่ บริษัทซีเกต บริษัทเวสเทินท์ดีจิตอล บริษัทฮิตาชิฮาร์ดิสไดฟ์
- 2553 ออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อการเรียนรู้ และจัดบรรยาย อบรมภาคสนาม ให้แก่ชุมชน อ. ครบุรี จ. นครราชสีมา
- 2548-2550 นักวิจัยในกลุ่มโครงการ Global Climate and Energy Project (GCEP) แหล่งทุนจาก Stanford University, USA
- 2539-2540 นักวิจัยห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Devices Research Laboratory, SDRL) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
- 2536-2537 อาจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ บางเขน กรุงเทพฯ

สาขาวิชาการที่มีความเชี่ยวชาญ

- การผลิตวัสดุผลึกนาโนสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่จาก nc-Si ink และ ZnO:Bi film การวิเคราะห์วัสดุสารกึ่งตัวนำชั้นสูง และวัสดุเก็บเกี่ยวพลังงาน
- การผลิตเซลล์อาทิตย์และพัฒนาประสิทธิภาพด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ
- ออกแบบระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ในแบบระบบอิสระและระบบที่เชื่อมต่อบริเวณสายส่ง
- ออกแบบระบบไฮบริดพลังงานทดแทนจากระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ และระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริก

ผลงานและรางวัล

1. ยื่นจดสิทธิบัตร Patent (25 ก.ค. 2558) การประดิษฐ์ “แผ่นพื้นอัจฉริยะสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแรงเฉื่อยเชิงกล” เลขที่คำขอ 1601002468
2. ยื่นจดสิทธิบัตร Patent (16 ธ.ค. 2558) การประดิษฐ์ “เซลล์นำไฟฟ้าพลังแสงด้วยผลึกนาโนทรงกลมซิงค์ ออกไซด์เจือสารบิสเมท และวิธีการผลิต” เลขที่คำขอ 1501007762
3. ลิขสิทธิ์ ลักษณะงานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ “โปรแกรมที่กำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดเอซีของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริด” เลขที่327427 (2558)
4. อนุสิทธิบัตรการประดิษฐ์ (3 ก.พ.2555) “การใช้วัสดุเทลลอนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โดยไม่ใช้สารละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์” เลขที่อนุสิทธิบัตร 6976
5. บทความยอดเยี่ยม Energy Materials paper award for 7th Conference on Energy Network of Thailand, 2011 “การสร้างชั้นพาสซีเวชันด้านหลังสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีการทะลุของอะลูมิเนียม และการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างชั้น”
6. Research Group Scholarship: Global Climate and Energy Project (GCEP) 2005-2007, Stanford University, USA
7. Ph.D. Scholarship สำนักงานนโยบายพลังงานแห่งชาติ ประเทศไทย ในหัวข้อวิทยานิพนธ์เกี่ยวกับ Third-generation of Silicon Solar cells ศึกษาที่ Centre of Excellence for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, UNSW, Australia

ภาระงานสอนและที่ปรึกษางานวิทยานิพนธ์

สอนในระดับปริญญาตรี ปริญญาโท และปริญญาเอก ในรายวิชาดังนี้

อิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม วิศวกรรมไฟฟ้า สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เซลล์แสงอาทิตย์ประยุกต์ เซลล์แสงอาทิตย์และระบบ เทคโนโลยีวงจรรวม วงจรรวมดิจิทัล และวัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า

ที่ปรึกษางานวิทยานิพนธ์

ฟิล์มบาง ZnO:Bi สำหรับป้องกันการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

หมึกฟอสฟอรัสสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงแบบ Selective Emitter Cell

เครื่องฉีดสารสำหรับสร้างชั้นพาสซีเวชันให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีต้นทุนต่ำ

สังเคราะห์ฟิล์มบางผลึกนาโนซิลิคอนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ Third Generation

การบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

1. งานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือบิสมัทด้วยการเติมสารลดแรงตึงผิวเพื่อประยุกต์ใช้งานทางเซลล์แสงอาทิตย์และออปโตอิเล็กทรอนิกส์
สถานภาพ ผู้ร่วมวิจัย (40%)
แหล่งทุน วช. 2558 เสร็จสมบูรณ์
2. งานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงค่าความนำไฟฟ้าและช่องว่างอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงของผลึกนาโนซิลิคอนควอนตัมคอตสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน วช. 2556 เสร็จสมบูรณ์
3. งานวิจัยเรื่อง การสร้างผิวซิลิคอนขรุขระรูปทรงพีระมิดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการใช้หน้ากากกริดในสารละลายเคมีที่ไม่ใช่ไฮโดรฟลูออริกแอคซอร์
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน วช. 2555 เสร็จสมบูรณ์
4. งานวิจัยเรื่อง เทคนิคต้นทุนต่ำด้วยการฉีดสารละลายเพื่อสร้างชั้นรอยต่อพาสซีเวชันคุณภาพสูงที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 2 ปี
แหล่งทุน วช. 2554-2555 เสร็จสมบูรณ์
2. งานวิจัยเรื่อง การเตรียมผลึกนาโนซิลิคอนและการประยุกต์ใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 2 ปี
แหล่งทุน วช. 2553-2554 เสร็จสมบูรณ์
3. งานวิจัยเรื่อง การศึกษาคุณภาพของผิวพาสซีเวชันด้านหลัง ต้นทุนต่ำ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน สกว. 2552 เสร็จสมบูรณ์
4. งานวิจัยเรื่อง การลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าเซลล์ด้วย ANISOTROPIC TEXTURE ETCHING เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน วช. 2552 เสร็จสมบูรณ์
5. งานวิจัยเรื่อง Global Climate and Energy Project (GCEP) 2005-2007, Stanford University, USA
สถานภาพ ผู้ร่วมวิจัย
แหล่งทุน Stanford University, USA
6. งานวิจัยเรื่อง การศึกษาเครื่องยนต์ฟลูอิดไดน์และการประยุกต์ใช้งาน : ออกแบบทรานสดิวเซอร์ในภาค tuning line
สถานภาพ หัวหน้าโครงการ ใช้ระยะเวลา 1 ปี (2545)
แหล่งทุน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เสร็จสมบูรณ์

งานวิจัยที่กำลังทำ

1. งานวิจัยเรื่อง การสร้างชั้นรอยต่อพาสซีเวชันคุณภาพสูงของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำจากการประทับลาย

สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน วช. 2558 ล่วงไปแล้ว 98%

2. งานวิจัยเรื่อง การสังเคราะห์หมึกผสมผลึกนาโนซิลิคอนสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่และต้นทุนต่ำ

สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 2 ปี
แหล่งทุน วช. 2557 ล่วงไปแล้ว 98%

ผลงานเผยแพร่

1. Supanut Laohawiroj, Apirak Mangkornkaew, Atthaphon Maneedaeng, **Thipwan Fangsuwannarak**, "Silicon composite ink for advanced photovoltaic generation prepared by low-cost technique" Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology, Volume 13 No.2 (2018)
2. กมลชนก เมฆหมอก วรากร ลឹมหิรี และ ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ "การสร้างชั้น Local Back Surface Field (LBSF) ที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนโดยวิธีการประทับลายด้วย Flash foam" การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 13-15 มิถุนายน 2561 จ.ระยอง หน้า 791-794
3. พิรุณี รัตนวิชัย ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ รุ่งเรือง พัฒนากุล และ ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ "การศึกษาสมบัติทางจุลโครงสร้างและทางแสงของฟิล์มบางผลึกนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทสำหรับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์" การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 13-15 มิถุนายน 2561 จ.ระยอง หน้า 879-885
4. ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ พิรุณี รัตนวิชัย รุ่งเรือง พัฒนากุล และ ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ "การสังเคราะห์ฟิล์มบางซิลิคอนดอทในเมตริกซ์ของซิงค์ออกไซด์ได้บิสมัทจากหมึกคอมโพสิตซิลิคอน และคุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดวัสดุชั้นสูง" การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 13-15 มิถุนายน 2561 จ.ระยอง หน้า 899-905
5. กมลชนก เมฆหมอก ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ และ ญัฐพล ช่วงสุวนิช "ผลของการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนแสงแบบ Gradient-Index ที่มีผลต่อสมบัติทางแสงและไฟฟ้าของการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์สีด้า" การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 31 พฤษภาคม-2 มิถุนายน 2560 จ. เชียงใหม่ หน้า 458-463
6. S. Chanrawangyot, S.T. Rattanachan, A. Watcharenwong, **T. Fangsuwannarak**, Antibacterial activity of ZnO nanoparticles coated on ceramic tiles prepared by sol-gel method, Journal of Metals, Materials and Minerals, Volume 27, Issue 2, p. 1-5 (2017)
7. A. Mangkornkaew and **T. Fangsuwannarak**, Characterization of patterns of Localized Doping Using Stamping technique for Selective n-Emitter Solar Cell Structure, Materials Science and Engineering 241, 012042 (2017)
8. Karoon Fangsuwannarak, Ponrawee Wanriko, **Thipwan Fangsuwannarak**, "Effect of Bio-polymer Additive on the Fuel Properties of Palm Biodiesel and on Engine Performance Analysis and Exhaust Emission" Energy Procedia, Volume 100, p. 227-236 (2016)

9. อภิรักษ์ มังกรแก้ว ชิตพงษ์ เกตุถนอม อีธัช เลหาวิโรจน์ และ ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ “การสร้างชั้นอิมิตเตอร์และชั้นไดอิเล็กตริกสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีการพิมพ์ลาย” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย 18-20 มิถุนายน 2559 จ. พิษณุโลก หน้า 458-463
10. W. Kempet, B. Marungsri, R. Yimnirun, W. Klysubun, **T. Fangsuwannarak**, S.T. Rattanachan, N. Pisitpipathsin, M. Promsawat, and S. Pojprapa, “Polarization Switching of PZT under Electrical Field via in-situ Synchrotron X-ray Absorption Spectroscopy” *Ferroelectrics*, 492: p.35–42 (2016)
11. อภิรักษ์ มังกรแก้ว และทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ “การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ด้วยเทคนิคพิมพ์ลาย” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON38) 18-20 พฤศจิกายน 2558 จ.พระนครศรีอยุธยา
12. **T. Fangsuwannarak** “IPA Free Texturization Process for Monocrystalline Silicon Solar Cells by PTFE Mask”, The Asian Conference on Sustainability, Energy and the Environment 2015, Kobe Japan, Proceeding p.363-369, 11-14 June (2015)
13. **T. Fangsuwannarak**, A. Mankornkaew, N. Phiwpha and S. Sopitpan, “Preparation of Different Phosphorus Concentration for N^+ Selective Emitter Solar cell by Spin on doping”, Grand Renewable Energy 2014, Tokyo Big Sight, Tokyo Japan, Proceeding P-PV-3-2, 27 July - 1 August (2014)
14. S. T. Rattanachan, J. Kaewphoka and **T. Fangsuwannarak**, “Annealing Atmosphere of Bismuth Doped Zinc Oxide Thin Films Prepared by CTAB-Assisted Sol-gel Method”, Grand Renewable Energy 2014, Tokyo Big Sight, Tokyo Japan, Proceeding P-PV-3-2, 27 July - 1 August (2014)
15. J. Kaewphoka, **T. Fangsuwannarak** and S.T. Rattanachan, “Synthesis of surfactant-assisted nanostructured Bi doped Zinc oxide for photo-sensing application”, Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2014 11th International Conference ID paper 1396, 15-17 May (2014)
16. N. Phiwpha, **T. Fangsuwannarak** and S. Sopitpan, “Locally contacted rear surface passivated solar cells by inkjet printing”, Proc. of SPIE Vol. 9234 92341B-1 (2014)
17. N. Phiwpha and **T. Fangsuwannarak**, “Surface Passivation of Point-Contacted Solar Cells by Inkjet Printing” *Integrated Ferroelectrics*, 149: pp.102-106, (2013)
18. S.T. Rattanachan, P. Krongarrom and **T. Fangsuwannarak**, “Influence of annealing temperature on characteristics of bismuth doped zinc oxide films” *American Journal of Applied Sciences* Volume 10, Issue 11, 1 October 2013, Pages 1427-1438 (2013)
19. **T. Fangsuwannarak** and K. Kunchana, “Optical Properties of Nano-crystalline Silicon Films Prepared by Using Sol-Gel Spin Coating Process” *The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics*, No. 43: pp.106-110 (2013)
20. **T. Fangsuwannarak**, K. Amonsurintawong and S. Sopitpan, “Aluminum-induced crystallization of p^+ silicon pinholes for the formation of rear passivation contact in solar cell” *Key Engineering Materials* Vol. 547 (2013) pp. 31-40 (2013) Trans Tech Publications,

Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.547.31

21. **T. Fangsuwannarak**, K. Khunchana and S.T. Rattanachan “Optical Band Gaps and Electrical Conductance of Si nanocrystals in SiO₂ Matrix for Optoelectronic Applications” Key Engineering Materials Vol. 545 (2013) pp 134-140 (2013) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.545.134
22. **T. Fangsuwannarak**, P. Krongarrom, J. kaewphoka and S. T. Rattanachan, “Bismuth doped ZnO films as anti-reflection coatings for solar cells” Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 978-1-4799-0545-4/13 ©2013 IEEE
23. K. Kunchana and **T. Fangsuwannarak**, “Thin Film preparation of silicon nanocrystals embedded in silicon oxide by sol-gel method” Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 978-1-4673-2025-2/12/ ©2012 IEEE
24. Phanuwat Krongarrom, Sirirat T Rattanachan, **Thipwan Fangsuwannarak**, “ZnO Doped with Bismuth in Case of In-Phase Behavior for Solar Cell Application” Engineering Journal, Vol 16, No 3 p. 59-70 (2012)
25. **T. Fangsuwannarak**, P. Krongarrom, and S. T. Rattanachan, “Synthesis and characterizations of bismuth doped zinc oxide via sol-gel technique for solar cells applications” 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 5-9 Sep. (2011)
26. P. Krongarrom, S.T. Rattanachan and **T. Fangsuwannarak**, "Structural and optical characterizations of n-type doped ZnO by sol-gel method for photovoltaic", Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2011 8th International Conference on, On page(s): 50 - 53, Volume: Issue: , 17-19 May (2011)
27. **ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์** กิตติศักดิ์ อมรสุรินทวงศ์ และ สุวัฒน์ โสภิตพันธ์ “การสร้างชั้นพาสซีเวชันด้านหลังสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีการทาสีของอะลูมิเนียม และการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างชั้นอะลูมิเนียมกับชั้นอะมอร์ฟัสซิลิคอน” การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 จ.ภูเก็ต 5 - 7 พฤษภาคม 2554 CEN12-562 (*บทความยอดเยี่ยมประเภทวัสดุพลังงาน*)
28. กิตติศักดิ์ อมรสุรินทวงศ์ และ **ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์** “ผลของการสะท้อนแสงของผิวเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีลวดลายพีระมิด” การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6, 5 - 7 พฤษภาคม 2553 ENETT6-1193
29. **T. Fangsuwannarak** and K. Amonsurintawong, “Texturisation of monocrystalline Si wafer by wet chemical etchants without surfactant additive through PTFE masks”, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition and 5th World Photovoltaics Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, 6-10 Sep. (2010)
30. **T. Fangsuwannarak** and G. Scardera, “Effect of Annealing Temperature on Dark Current Density of Silicon nanocrystals embedded in a Nitride Matrix for Photovoltaic

- Application,” Proc. the 5th International Conference in Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology, On page(s): 797 - 800, Volume: Issue: , 14-17 May (2008)
31. **T. Fangsuwannarak**, E.C. Cho, G. Conibeer, Y. Huang, T. Trupke and M.A. Green, “Analysis of The Effect of Silicon Quantum Dot Density on The Photoluminescence Spectra of Silicon Dot/Silicon Dioxide Superlattices,” *Proc. 21th European Photovoltaic Solar Energy Conf. Dresden, Germany*, (2006)
 32. **T. Fangsuwannarak**, E. Pink, Y. Huang, G. Scardera, G. Conibeer, M. A. Green, “Effects of Silicon Nanocrystallite Density on The Raman-Scattering Spectra of Silicon Quantum Dot Superlattices,” *Proc. SPIE 6415-07* (2006)
 33. G. Conibeer, M. A. Green, R. Corkish, Y. Cho, E-C. Cho, C-W Jiang, **T. Fangsuwannarak**, E. Pink, Y. Huang, T. Puzzer, “Silicon Nanostructures for Third Generation Photovoltaic Solar Cells,” *Thin Solid Film*, **511-512**, 654 (2006).
 34. M. A. Green, E-C. Cho, Y. Cho, Y. Huang, E. Pink, T. Trupke, A. Lin, **T. Fangsuwannarak**, T. Puzzer, G. Conibeer, and R. Corkish, “All-Silicon Tandem Cells Based on “Artificial” Semiconductor Synthesised Using Silicon Quantum Dots in Dielectric Matrix,” *The 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Dresden* (2006)
 35. Scardera, T. Puzzer, D. McGrouther, E. Pink, **T. Fangsuwannarak**, G. Conibeer, and M. A. Green, “Investigating Large Area Fabrication of Silicon Quantum dots in a Nitride Matrix for Photovoltaic Applications,” *IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii*, **122** (2006)
 36. **T. Fangsuwannarak**, E. Pink, Y. Huang, Y. H. Cho, G. Conibeer, T. Puzzer, and M. A. Green, “Conductivity of Self-Organized Silicon Quantum Dots Embedded in Silicon Dioxide,” *Proc. SPIE 6037*, 60370T (2005)
 37. M. A. Green, E-C. Cho, Y. Cho, Y. Huang, E. Pink, T. Trupke, A. Lin, **T. Fangsuwannarak**, T. Puzzer, G. Conibeer, and R. Corkish, “Artificial Semiconductor Synthesised Using Si Quantum Dots in a Dielectric Matrix,” *The 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Barcelona* (2005)
 38. D. Kruangam, **T. Sujaridchai**, K. Chirakawikul, B. Ratwises and S. Panyakeow, “Novel amorphous silicon alloy optoelectronic integrated circuits,” *Journal of Non-Crystalline Solids* **227-330**, 1146-1150 (1998)
 39. K. Chirakawikul, **T. Sujaridchai**, B. Ratwises, D. Kruangam, S. Panyakeow, W. Boonkosum, T. Sugino and J. Shirafuji, “Preparation of p-type polycrystalline diamond films and their applications to hole injection layers in amorphous SiC:H thin film light emitting diodes,” *Journal of Non-Crystalline Solids*, **227-230**, 1156-1159 (1998)
 40. W. Boonkosum, D. Kruangam, B. Ratwises, **T. Sujaridchai**, S. Panyakeow, S. Fujikake and H. Sakai, “Amorphous SiO:H thin film visible light emitting diode,” *Journal of Non-Crystalline Solids*, **198-200**, 1226-1229 (1998)

41. D. Kruangam, B. Ratwiset, **T. Sujaridchai**, S. Panyakeow, and W. Boonkosum, "Novel Application of Amorphous Silicon Flexible Solar Cells As Battery Charger for Personal Mobile Telephone," Technical Digest of the International PVSEC-9, Japan (1996)
42. D. Kruangam, **T. Sujaridchai**, K. Chirakawikul, B. Ratwiset and S. Panyakeow, "Application of Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition to the Fabrication of Si Alloy Optoelectronic Devices," Proceeding of 8th ASIAN Conference on Electrical Discharge ACED, Siam Inter-Continental, Bangkok (1996)
43. D. Kruangam, **T. Sujaridchai**, K. Chirakawikul, B. Ratwiset and S. Panyakeow, "Basic Properties of Amorphous Silicon Alloys for Optoelectronic IC Applications," Proceeding of Regional Symposium on Material Science, Fundamental and Applications on Semiconductor and Superconductors, Philippines (1996)
44. W. Boonkosum, D. Kruangam, B. Ratwiset, **T. Sujaridchai** and S. Panyakeow, "Visible Amorphous SiO:H Thin Film Light Emitting Diode," International Conference Amorphous Semiconductors Science&Technology (ICAS) (1995)
45. D. Kruangam, W. Boonkosum, B. Ratwiset, **T. Sujaridchai** and S. Panyakeow, "Fabrication of Amorphous Silicon Alloy Optical Devices for New Types of Thin Film Optoelectronic Integrated Circuits," Australia Microelectronic Conference (MICRO), Adelaide, Australia (1995)
46. W. Boonkosum, **T. Sujaridchai**, D. Kruangam, B. Ratwiset and S. Panyakeow, "Novel Matrix and Multi-Layer Amorphous Thin Film LED Flat Panel Display," Spring Meeting of Materials Research Society (MRS), Symposium V-Flat Panel Display San Francisco, USA, (1995)